

TEKNISKA HÖGSKOLAN I LUND



Packad lermoräns hållfasthets- och kompressionsegenskaper

Bo S Malmberg

AVDELNINGEN FÖR GEOTEKNIK

1983

av

Bo Stigson Malmberg

Östgöta nation

Akademisk avhandling som framlägges till offentlig granskning vid disputation för teknisk doktorsexamen i ämnet Geoteknik vid Tekniska Högskolan i Lund, sektionen för väg- och vattenbyggnad, fredagen den 16 december 1983 kl. 10.15 i sal V:A, John Ericssons väg 1, Tekniska Högskolan i Lund.

Fakultetsopponent:

teknisk dir. Lars Forssblad

Avhandlingsexaminator:

tf professor Leif Bjelm

Organization LUND UNIVERSITY		Document name DOCTORAL DISSERTATION	
		Date of issue 1983-11-24	
		CODEN: LUTVDG/(TVGT-1001)/1-344/1983	
Author(s) Malmöborg, Bo s		Sponsoring organization BFR	
Title and subtitle Strength and Compressibility of Compacted Silty and Clayey Till.			
Abstract Clayey and silty tills are abundantly present in Skåne, the very southern part of Sweden. In the light of the constantly increasing prices for gravels and sands, there is a growing interest in replacing, as far as possible, the use of gravels and sands for filling purposes with clayey and silty tills. To make this possible, there is a need for knowledge in the field of strength and compressibility characteristics of compacted fine grained soils. At three different sites (Gunneshö, Dubbelknappen and Oxie) extensive field and laboratory investigations have been carried out. At the two first mentioned sites, the emphasis has been put on laboratory investigations. The effect of different water content, dry density and clay content on undrained and drained shear strength as well as on compressibility has been studied by carrying out unconfined compression tests, (standard, active and passive) triaxial and oedometer tests. The results show that with increasing clay content the importance of water content and dry density on strength and compressibility increases respectively decreases. The shear strength decreases and the compressibility increases with increasing water content. To make a statistical work-up of test data possible, the field investigations carried out at the Oxie site have been extensive. A test fill was constructed, which was compacted in different areas with 2, 4 and 8 roller passes with a vibratory roller. Also the water content was varied in such a way that one half of the fill was constructed with material at its natural water content and the other half with sun- and airdried material. In that way 6 areas were built up under different circumstances. The fill was built up in 6 lifts, each lift approximately 0.3 m thick. In each lift, density measurements with rubber membrane volumeter and shear-wave velocity determinations were carried out. When the fill was completed, cone penetration tests (with electrical tip), weight- and vane-soundings, as well as pressiometer tests and falling weight tests were carried out. Furthermore, 12 plate bearing tests (2 on each of the 6 areas) were performed with a circular plate (D = 0.72 m). The effect of the different treatments was analysed using "analysis of variance". The test results show that, at water contents close to optimum and with insufficient compaction effort, a lumpy structure of collapsing nature was obtained. At wet-side compaction, moderation with the compaction effort is recommended. The use of heavy equipment, producing high contact pressures, will cause an unwanted remoulding of the soil which will destroy its natural consolidation. Cone penetration tests (electrical tip type) and pressiometer tests can be used successfully to predict arising settlements under foundations. A control criterion is proposed at the result control, based on the calculated settlement for a circular foundation with a diameter of 1.0 m. The comparison between laboratory and field investigation results shows that laboratory results cannot, without restrictions be transferred to field conditions, especially at dry-side compaction. The reason for this is that the lumpy structure that will be obtained at dry-side field compaction will not be obtained in such an obvious manner at laboratory compaction. For silty tills with low clay content, wet-side compaction is recommended to avoid getting a fill with a collapsing structure. For tills with a higher clay content, the compaction is recommended to be carried through at a lower water content, because of the greater risks for the arising of high porewater and poreair pressures during compaction. The risk of getting a collapsing structure using material with higher clay content is judged to be smaller due to higher true strength and a more plastic behaviour.			
Key words Clay fill, water content, clay content, shear strength, compressibility, compaction effort, degree of compaction, compaction control, plate bearing tests			
Classification system and/or index terms (if any)			
Supplementary bibliographical information			Language Swedish
ISSN and key title			ISBN
Recipient's notes		Number of pages 344	Price SEK 120:-
		Security classification	

Distribution by (name and address)

I, the undersigned, being the copyright owner of the abstract of the above-mentioned dissertation, hereby grant to all reference sources permission to publish and disseminate the abstract of the above-mentioned dissertation.

Signature

Date

1983/11/7

Packad lermoräns hållfasthets- och kompressionsegenskaper

Bo S Malmborg



Printed in Sweden
Studentlitteratur
Lund 1983

Förord

Hållfasthets- och kompressionsegenskaper hos packade silt- och lermoräner behandlas i denna avhandling. Försöken har bestått av laboratorie- och fältförsök. Försöken har varit omfattande, framförallt i fält, varför endast delar av data återges i denna rapport. Samtliga data finns redovisade i avdelningens interna rapportserie.

En stor del av undersökningen har finansierats genom anslag från Statens Råd för Byggnadsforskning. Vidare har personer vid Malmö kommuns fastighetskontor, HB-consult Malmö, Scandia-consult Malmö, K-konsult Lund samt Ahstells Entreprenad AB Södra Sandby, på ett positivt sätt stött mig under arbetets gång och även givit ekonomiskt bidrag.

Undersökningen har utförts vid avdelningen för Geoteknik, institutionen för Geoteknologi, Tekniska Högskolan i Lund. Handedare har varit överdirektör Jan Hartleén vid Statens geotekniska institut, vid projektets början universitetslektor vid avdelningen. Mitt varma tack till min handledare för visat intresse och nedlagd möda.

Delar av den experimentella undersökningen har under min ledning utförts som examensarbeten av L Andersson, H Bjurek, A Carlsson, S Dimitrios, B Hammarling, L Våppling, vilka tackas för väl utförda arbeten.

Vid planeringen av den stora fältundersökningen vid Oxie deltog ass J O Svantesson, institutionen för Matematisk Statistik Tekniska Högskolan i Lund, på ett förtjänstfullt sätt.

Jag vill även framföra mitt varma tack till mina kollegor, såväl inom som utom institutionen, för all den hjälp jag fått under arbetets gång.

Ett varmt tack även till min familj som tidvis tvingats und-
vara sin avhållne make och far.

Lund i november 1983

Bo Stigson Malmberg

INNEHÅLL

SAMMANFATTNING

1	BAKGRUND.....	1
2	SYFTE OCH BEGRÄNSNING.....	3
3	LITTERATURÖVERSIKT.....	4
3.1	Inledning.....	4
3.2	Finkornig jords packbarhet.....	5
3.3	Packad finkornig jords hållfasthet och struktur....	9
3.4	Packad finkornig jords kompressibilitet.....	22
3.5	Kontroll av packad finkornig jord.....	30
3.6	Metodik vid packningskontroll.....	42
3.7	Utförande och erfarenheter i Sverige.....	54
4	EGNA UNDERSÖKNINGAR - LOKALBESKRIVNINGAR.....	65
5	FÖRSÖKSLOKAL OXIEVÅNG.....	71
5.1	Försöksutförande.....	71
5.1.1	Allmänt.....	71
5.1.2	Compactometern.....	72
5.1.3	Fallviktsretardationsmätning.....	74
5.1.4	Skjuvvågshastighetsbestämning.....	77

5.1.5	Statiska plattbelastningsförsök.....	81
5.1.6	Försöksuppläggning.....	84
5.1.7	Iordningställande av provytor.....	88
5.2	Försöksutvärdering och försöksresultat.....	92
5.2.1	Densitet.....	92
5.2.2	Vattenkvot.....	96
5.2.3	Compactometervärden.....	99
5.2.4	Skjuvvågshastighetsbestämningar.....	104
5.2.5	Viktsondering.....	108
5.2.6	Vingsondering.....	116
5.2.7	Spetstrycksondering.....	122
5.2.8	Pressometermodul och kryptryck.....	128
5.2.9	Fallviktsförsök.....	140
5.2.10	Statisk plattbelastning.....	150
6	FÖRSÖKSLOKAL DUBBELKNAPPEN.....	161
6.1	Allmänt.....	161
6.2	Fältundersökningar.....	161
6.2.1	Densitetsbestämningar.....	163
6.2.2	Viktsondering.....	164
6.2.3	Vingsondering.....	164
6.2.4	Trycksondering.....	164
6.2.5	Egensättningar.....	165
6.2.6	Statiska plattbelastningsförsök.....	166
6.3	Laboratorieförsök.....	168
6.3.1	Hållfasthet.....	168
6.3.2	Kompressibilitet.....	170
6.4	Resultat.....	172
6.4.1	Densitetsbestämningar.....	172
6.4.2	Viktsondering.....	175
6.4.3	Vingsondering.....	178
6.4.4	Trycksondering.....	180

6.4.5	Egensättningar.....	182
6.4.6	Statiska plattbelastningsförsök.....	183
6.4.7	Hållfasthet.....	186
6.4.8	Kompressibilitet.....	198

7	FÖRSÖKSLOKAL GUNNESBO.....	199
---	----------------------------	-----

7.1	Allmänt.....	199
7.2	Fältundersökningar.....	201
7.2.1	Densitetsbestämningar.....	201
7.2.2	Vattenkvotsbestämningar.....	201
7.2.3	Viktsondering.....	202
7.2.4	Vingsondering.....	202
7.2.5	Plattbelastningsförsök.....	202
7.3	Laboratorieförsök.....	204
7.3.1	Hållfasthet.....	204
7.3.2	Kompressibilitet.....	205
7.4	Resultat.....	207
7.4.1	Densitetsbestämningar.....	207
7.4.2	Vattenkvotsbestämningar.....	211
7.4.3	Viktsondering.....	212
7.4.4	Vingsondering.....	217
7.4.5	Plattbelastningsförsök.....	222
7.4.6	Hållfasthet.....	225
7.4.7	Kompressibilitet.....	231

8	HÅLLFASTHET OCH SÄTTNINGAR ENLIGT FÄLTUNDERSÖKNINGAR.....	234
---	--	-----

8.1	Allmänt.....	234
8.2	Hållfasthetsbestämning.....	235
8.2.1	Trycksondering.....	237

8.2.2	Vingsondering.....	240
8.3	Sättningar.....	242
8.3.1	Trycksondering.....	242
8.3.2	Vingsondering.....	254
8.3.3	Viktsondering.....	256
8.3.4	Pressometerförsök.....	259
8.3.5	Skjuvvågshastighet.....	265
8.3.6	Fallviktsförsök.....	269

9	JÄMFÖRELSE RELLAN COMPACTOMETER OCH NAGRA FÄLTMETODER.....	274
---	---	-----

9.1	Torrdensitet.....	275
9.2	Vattenkvot.....	276
9.3	Spetstrycksondering.....	277
9.4	Viktsondering.....	279
9.5	Vingsondering.....	280
9.6	Skjuvvågshastighet.....	281
9.7	Slutsats.....	282

10	SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER.....	283
----	--------------------------------------	-----

10.1	Slutsatser.....	283
10.2	Rekommendationer.....	289

11	LITTERATUR.....	292
----	-----------------	-----

	BILAGOR.....	301
--	--------------	-----

Sammanfattning

Olika faktorerers inverkan på hållfasthets- och kompressions-egenskaper hos packad silt- och lermorän har studerats såväl i fält som i laboratorium. De faktorer som främst undersökts är lerhalt, vattenkvot, uppnådd torrdensitet samt mängden packningsarbete.

Vidare har olika metoders lämplighet för kontroll av fyllningar utförda med silt- eller lermorän studerats.

Laboratorieförsöken visar att vattenkvotens betydelse ökar och torrdensitetens minskar med ökand lerhalt. Detta gäller för såväl odränerad och dränerad skjuvhållfasthet som kompressibilitet.

Vid 20 % lerhalt medför en ökande vattenkvot genomgående avtagande hållfastheter och kompressionsmoduler.

Vid 10 % lerhalt erhålles de högsta hållfastheterna vid optimal vattenkvot, medan kompressibiliteten blir lägst vid packning på torra sidan. Skillnaden mellan torra och våta sidan avtar med ökande torrdensitet.

De i fält utförda undersökningarna visar att vid torrpäckning måste packningsarbetet vara omfattande och de använda packningsredskapen kraftfulla med god förmåga att bryta ned de fasta jordklumparna. Vid våtpäckning rekommenderas däremot återhållsamhet med packningsarbetet och maskintyngd.

Den skillnad i makrostruktur som erhålles vid laboratoriepackning i jämförelse med packning i fält, medför att laboratoriebestämningar av hållfasthets- och kompressionsegenskaper ej är direkt överförbara till fältförhållanden. Vid framförallt torrpäckning, erhålles i fält en makrostruktur som till stor del utgörs av fasta jordklumpar, vilka ej brutits ned vid packningen. Som följd härav rekommenderas användandet av fältmetoder för att bestämma hållfasthet och sättningar.

Hur stora grundtryck som kan tillåtas i dessa fyllningar blir beroende av storleken på de sättningar som kan accepteras, dock varnas för kollaps i torrpackad lerfattig morän.

Olika faktorerers inverkan på homogeniteten i färdig fyllning belyses i litteraturoversikten. Där framgår bl a utförande-kontrollens betydelse. Vidare återges en, av Parsons (1979) framtagen, snabb metod för att bedömma jordmassors lämplighet för fyllningsändamål.

För resultatkontrollen rekommenderas användandet av någon eller några av följande metoder

- spetstrycksondering
- pressometerförsök
- viktsondering

Som kontrollkriterium föreslås den beräkningsmässiga sättningen för en cirkulär platta. Därvid kan Jaky's metod för bestämning av sättningen hos en platta användas. Den i uttrycket ingående modulen kan till sin storlek bestämmas som

$$M = 4 \cdot q_c \quad (\text{MPa})$$

vid spetstrycksondering

och

$$M = 4 \cdot (1.60 + 0.175 \cdot h_v) \quad (\text{MPa}) \quad 4 < h_v < 25$$

vid viktsondering,

där

M = kompressionsmodul (MPa)

q_c = spetstrycket (MPa)

h_v = antalet halvvarv för 0.2 m sjunkning

Vid användandet av pressometer som kontrollmetod så kan den av Baguelin et al (1978) föreslagna metoden för sättningsberäkning användas.

För att bedömma kryptryckets (q_k) storlek vid plattbelastning kan antingen spetstryck- eller vingsondering användas.

Vid spetstrycksondering gäller att

$$q_k = 0.2 * q_c \quad \text{i våtpackad fyllning}$$

och

$$q_k = 0.05 * q_c \quad \text{i torrpackad fyllning}$$

där

q_k = kritiskt grundtryck vid plattbelastning (MPa)

q_c = spetstryck vid spetstrycksondering (MPa)

Vid vingsondering gäller att

$$q_k = 2.5 \cdot \tau_{fu} \quad \text{i våtpackad fyllning}$$

och

$$q_k = \tau_{fu} \quad \text{i torrpäckad fyllning}$$

där

q_k = kritiskt grundtryck vid plattbelastning (kPa)

τ_{fu} = "skjuvhållfasthet enligt vingsond (kPa)

1 Bakgrund

Allmänt sett är Sverige ett land med god tillgång på sand och grus. Det beror främst av glaciationen och deglaciationen i kombination med berggrundens beskaffenhet, vilken till övervägande del utgörs av eruptiva och metamorfa bergarter. Lokalt finns dock sedimentära bergarter överlagrade.

I Skåne, vilket utgör det sydligaste landskapet i Sverige, utgörs berggrunden till stor del av kalkberg. I samband med ismassornas framdrift maldes stora delar av detta kalkberg ned till en heterogen massa. De jordarter som på så sätt bildades var huvudsakligen ler- och siltmoräner vilka därför är rikligt förekommande i speciellt den sydvästra delen av Skåne.

Sydvästra delen av Skåne är tätbefolkad. Detta har skapat en stor efterfrågan på grus- och sandmaterial i samband med regionens expansion. De förekomster av grus och sand som funnits inom regionen har utnyttjats hårt varför sand och grus idag är en bristvara. Av detta har följt att priserna på dessa material skjutit i höjden, vilket resulterat i ett ökat intresse från framförallt kommunerna i regionen att om möjligt ersätta användandet av grus och sand i jordfyllningar med "sämre" och därmed billigare massor.

Av naturliga skäl har intresset då inriktats mot den inom regionen vanligaste jordtypen, nämligen ler- och siltmoräner. Dessa erhålles i stor mängd vid snart sagt varje schaktföretag och kördes tidigare direkt till tipp. Inom den största kommunen i regionen, Malmö, användes idag regelmässigt ler- och siltmoräner för fyllningsändamål.

Svensk Byggnorm vilken reglerar byggnadsverksamheten i Sverige tillåter för närvarande (SBN 80) generellt inte användandet av jord för fyllningsändamål med en större finjordshalt än 10 %, räknat på material mindre än 20 mm. Detta förhållande har säkert bidragit till att användandet av finkornig jord för fyllningsändamål ej vunnit sådan spridning som ur kostnadsynpunkt skulle vara motiverat. En av övriga faktorer som hållit tillbaka användandet utgör väderleken. Vintrar med temperaturer under noll omöjliggör fyllningsarbeten med fin-

kornig jord under halva året. Somrarna kan vissa år vara tämligen nederbördsrika vilket skapar problem med för våta fyllningsmassor. Detta har ofta medfört problem med att hålla uppgjorda tidplaner.

Att SBN (80) ej generellt godkänner användandet av finkornig jord för fyllningsändamål har sin orsak i, att kunskapen om hur dessa fyllningsmassor skall hanteras och vilka egenskaper den färdiga fyllningen erhåller, är starkt begränsad i Sverige. Än mindre finns det kunskap om vilka kontrollmetoder och därmed förknippade kontrollkriterier som skall gälla för att säkerställa att fyllningsarbetena utföres på ett sådant sätt att kraven på den färdiga fyllningen uppfylls.

I avsikt att öka kunskapen om ler- och siltmoräners egenskaper som fyllningsmassor startades 1975 vid avdelningen för Geoteknik vid Tekniska Högskolan i Lund ett projekt med finansiellt stöd av Statens Råd för Byggnadsforskning, BFR. Inom projektet har tidigare 2 rapporter publicerats och föreliggande rapport är projektets slutrapport.

Rapporten lägges fram som doktorsavhandling.

2 Syfte och begränsning

Projektets syfte har varit att söka klargöra hur faktorerna packningsarbete, vattenkvot och lerhalt inverkar på egenskaperna hos lermoränfyllning utlagd och packad skiktvis.

Projektets syfte har däremot inte varit att klargöra hur olika typer av packningsmetoder och därmed packningsredskap påverkar resultatet. Ej heller har projektets syfte explicit varit att fastställa optimala lagertjocklekar eller optimal mängd packningsarbete för uppnående av bästa möjliga resultat. Effekten av inblandning av hållfasthets- och kompressibilitetsförbättrande medel (jordförstärkning) har ej heller ingått i projektets syfte att klargöra.

Förutom vad som angivits i första stycket har målsättningen varit att klargöra olika metoders lämplighet för packningskontroll i finkornig jordfyllning av typ lermorän. I begreppet lämplig ingår bedömanden om en methods förmåga att avslöja skillnader mellan fyllningsytor behandlade på olika sätt samt möjligheten att utifrån detta bedöma hållfasthet och kompressibilitet. Till en potentiellt lämplig metod måste även kunna kopplas kriterier med vars hjälp avgöranden kan fattas om hurvida resultatet bör leda till att den kontrollerade fyllningen har sådana egenskaper att den bör godkännas eller underkännas. Avsikten har varit försöka finna sådana kriterier.

Sammanfattningsvis kan det yttersta syftet med projektet sägas ha varit att öka kunskapen om dessa fyllningars egenskaper samt att anvisa kontrollmetoder med sådan tillförlitlighet att normgivande myndigheter kan ge generellt godkännande för utförandet av fyllningsarbeten med ler- och siltmoräner.

3 Litteraturöversikt

3.1 Inledning

Översikten är indelad i fyra huvuddelar. Problematiken med att utföra och kontrollera packningen i en finkorning jord kan på ett naturligt sätt sönderdelas i följande delproblem

- jordens packbarhet; hur påverkas erhållen struktur, hållfasthet och kompressibilitet av uppnådd densitet och vattenkvot samt packningsmetod.
- kontrollparameter; vilken eller vilka parametrar är relevanta för att kontrollera resultatet av utförd packning och hur skall dessa parametrars värde bestämmas.
- kontrollkriterier; vilka krav skall uppfyllas vid kontrollen för att den kontrollerade fyllningen skall godkännas.

Avslutningsvis behandlas svenska erfarenheter och föreskrifter.

3.2 Finkornig jords packbarhet

Den i packningssammanhang så välkända packningskurvan får vid packning av finkornig jord det karaktäristiska utseende som återges i fig 3.1. Flera förklaringar till kurvans utseende har avgetts under de senaste 50 åren. Nedan återges de viktigaste. Sammanställningen är delvis hämtad från Hilf (1975).

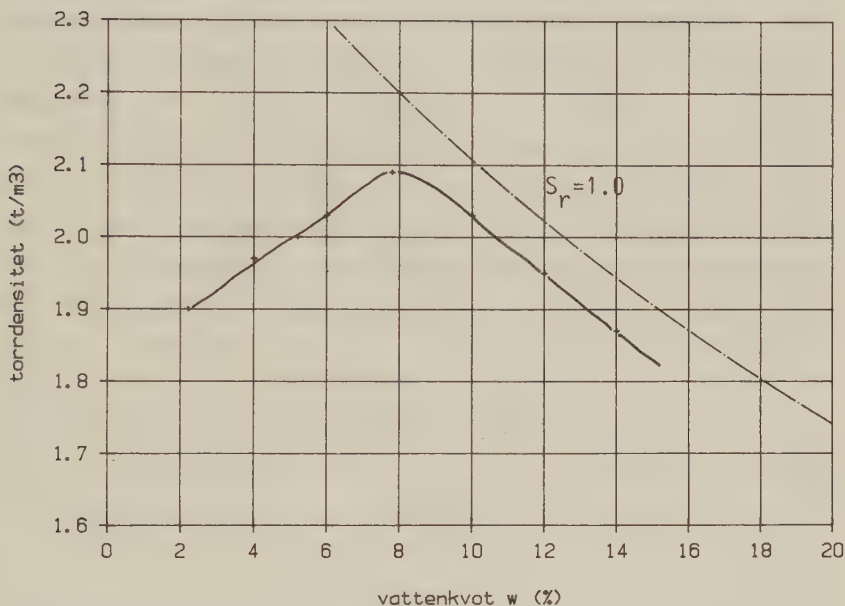


FIG 3.1 För finkornig jord typisk packningskurva.

Proctor (1933) menade att det vatten som finns närvarande i en relativt torr jord skapar kapillära spänningar vilka i sin tur orsakar höga friktionskrafter mellan partiklarna. Dessa friktionskrafter motverkar packningen. Genom att öka mängden närvarande vatten underlättas partiklarnas relativa rörelser. På så sätt erhålles med ökande vattenkvot en mer välordnad struktur och därmed högre torrdensitet. Genom att gradvis tillsätta mera vatten så uppnås en punkt där vattnet tillsammans med en liten mängd innesluten luft helt utfyller det tillgängliga porutrymmet efter avslutad packning. Att ytterligare öka mängden vatten resulterar i att en större porvolym erfordras för

att rymma vattentillskottet. Resultatet blir en minskande torrdensitet.

Hogentogler (1936) ansåg att packningskurvan kunde indelas i fyra delar, var och en representerad av en rät linje, under förutsättning att erhållen torrdensitet avsättes mot $V_w/(V_w + V_s)$ eller annorlunda uttryckt $(S_r \cdot e)/(S_r \cdot e + 1)$, fig 3.2. Under kurvans första del sker en vattenupptagning inuti de fasta partiklarna samt bildas en tunn vattenfilm runt desamma. Utmed kurvans andra del sker en tillväxt av vattenfilmen runt partiklarna vilket ger en smörjande effekt. Den smörjande effekten ökar med ökande vattenkvot upp till en viss gräns. Vid passerandet av denna gräns orsakar ökad vattenkvot en allt större "svällning", med minskande torrdensitet som följd. Svällningen sker vid oförändrad mängd innesluten luft. Den fjärde fasen innebär att den innesluten luften byts ut mot vatten.

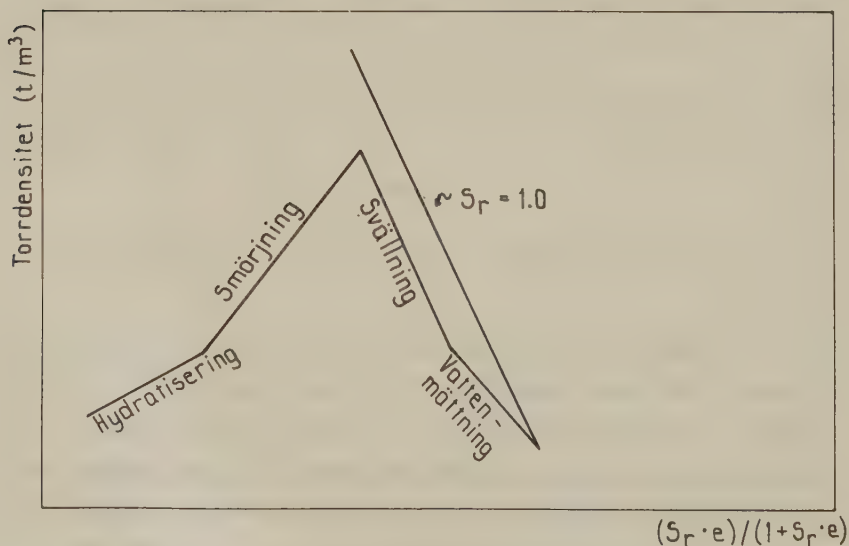


FIG 3.2 Packningskurvans fyra delar.
(efter Hogentogler)

Hilf (1956) förklarade packningskurvans utseende med närvaron av kapillära spänningar och porgastryck. I torra jordar har vattenmeniskerna en starkt krökt form vilket gör att de motstår packningsarbetet. Med ökad vattenkvot minskar meniskernas kurvation och deras motståndskraft avtar och därmed låter sig jorden lättare packas. Denna mekanism är verksam upp till en gräns över vilken en ytterligare ökning av vattenkvoten resulterar i en inestängning av luft i jorden. Denna inestängda luft motverkar packningsarbetet med lägre torrdensitet som följd.

Lambe (1960) söker förklara packningskurvan från elektrokemiska utgångspunkter. När vattenkvoten är låg så är samtidigt den elektrolytiska koncentrationen hög vilket resulterar i en flockig struktur. Med ökat vatteninnehåll minskar den elektrolytiska koncentrationen med en mer dispergerad struktur som följd. Detta i sin tur medför högre torrdensitet. Att öka vattenkvoten ytterligare utöver vad som behövs för att erhålla en dispergerad struktur medför att partiklarnas omgivande vattenskikt tillväxer och ett större avstånd mellan partiklarna och därmed lägre torrdensitet erhålles.

Olson (1963) menade att en ökning av vatteninnehållet vid packning av en relativt torr jord, resulterar i en ökning av porvatten- och porgastrycken. Därvid kommer effektivspänningen att minska och jordpartiklarnas relativa rörelser underlättas. Partiklarna glider över varandra till dess att tillräckligt stora horisontella spänningar utvecklats, för att jorden skall uppnå den hållfasthet som krävs, för att motstå packningen utan att omfattande skjuvning äger rum. När jorden i detta stadium utsättes för ytterligare slag blir den ytterligare packad beroende på följande tre faktorer:

- ökande kvarstående horisontella spänningar

- ökande kvarstående negativa porvattentryck
- minskande skjuvinitierade porvattenövertryck

Den ovan beskrivna effekten ökar med ökande vattenkvot och resulterar således i en allt högre torrdensitet upp till den gräns där det ej längre finns några kontinuerliga porer. Därvid inestängs porgas vilket omöjliggör en ytterligare ökning av torrdensiteten.

Barden & Sides (1970) visade genom försök att den låga densiteten vid låga vattenkvoter orsakas av luftfyllda makroporer (3-5 mm). Dessa finns mellan pelletsliknande makroklumpar med hög hållfasthet. Makroklumparna motstår därför packningen utan att nämnvärt deformeras. Med ökande vattenkvot blir klumparna mjukare och deformeras alltmer och utfyller därvid gradvis makroporerna. Vid optimal vattenkvot är klumparna så deformerade att de helt fyller ut de tidigare makroporerna. Detta medför att något kontinuerligt porsystem ej längre finns. Barden & Sides visade genom försök att permeabiliteten för luft hastigt gick ned till noll när vattenkvoten närmade sig den optimala. En ytterligare ökning av vattenkvoten utöver den optimala resulterar i att partiklarnas vattenskikt tillväxer och torrdensiteten minskar.

3.3 Packad finkornig jords hållfasthet och struktur

Hållfasthet

Med hållfastheten hos en fyllning av finkornig jord avses vanligtvis den odränerade skjuvhållfastheten, eftersom den ingenjörsmässiga tillämpningen ofta är att bedömma stabiliteten hos jorddammar, under utförandestadiet. Ofta är det då fråga om brottutveckling under odränerade förhållanden. Det är därför naturligt att de flesta artiklar som återfinnes i litteraturen behandlar just den odränerade skjuvhållfastheten. Att den odränerade skjuvhållfastheten påverkas av torrdensitet och vattenkvot vid packningen råder det stor enighet om. Däremot går åsikterna isär beträffande om och hur packningsmetoden inverkar. Det är därför svårt att behandla den odränerade skjuvhållfastheten frikopplad från packningsmetod varför inverkan av packningsmetod vävts in i detta avsnitt.

Leonards (1953) fann genom odränerade triaxialförsök på två inpackade lerjordar, att hållfastheten var en funktion av portalet vid brott. Deviatorspänningen avsatt i logaritmisk skala visade sig vara starkt kopplad till portalet, likaledes avsatt i logaritmisk skala. Förutsatt att de initiella förhållandena var lika så påverkades denna relation inte av celltryck eller om dränering tilläts eller ej. Vattenmättningsgraden hade inte heller någon inverkan. Detta förklarade Leonards bero på att icke vattenmättade jordar kan ändra sitt portal utan att vattenkvoten ändras. Leonards fann även att för en given vattenkvot så erhöles en större ökning av hållfastheten genom isotrop konsolidering än genom packning, i en riktning.

Hilf (1975) ifrågasätter det kloka i den rådande tendensen att i allt högre grad utföra fyllningsarbeten genom våtpackning. Anledningen till det ökande intresset för våtpackning, nämligen att säkerställa ett plastiskt beteende hos fyll-

ningen, är enligt Hilf grundad på felaktiga slutsatser. Försök av Lee & Haley (1968) har nämligen visat att det spröda brott som så ofta redovisats inträffa i jord packad på torra sidan, endast inträffar för låga värden på den minsta huvudspänningen. Dessutom, menar Hilf, så ökar de portyck som uppträder i samband med packningen mycket snabbt vid vattenkvoter vid eller strax över den optimala. Detta kan man utläsa ur fig. 3.3 vilken återger det av Hilf framtagna redovisningssättet för packningskurvan. De två bågformade kurvorna i figuren är packningskurvor för en och samma jord vid olika packningsarbete. Ur figuren kan det, vid en ökning av packningsarbetet (vid punkt D), erhållna porgastrycket beräknas såsom

$$\frac{u_a}{P_a} = D \cdot D^- / D^- \cdot D^- \quad (3.1)$$

På motsvarande sätt kan porgastrycket i förhållande till atmosfärstrycket beräknas i punkterna E, F, G och H. Ur fig 3.3 framgår då den snabba ökningen av porgastrycket med ökande vattenkvot.

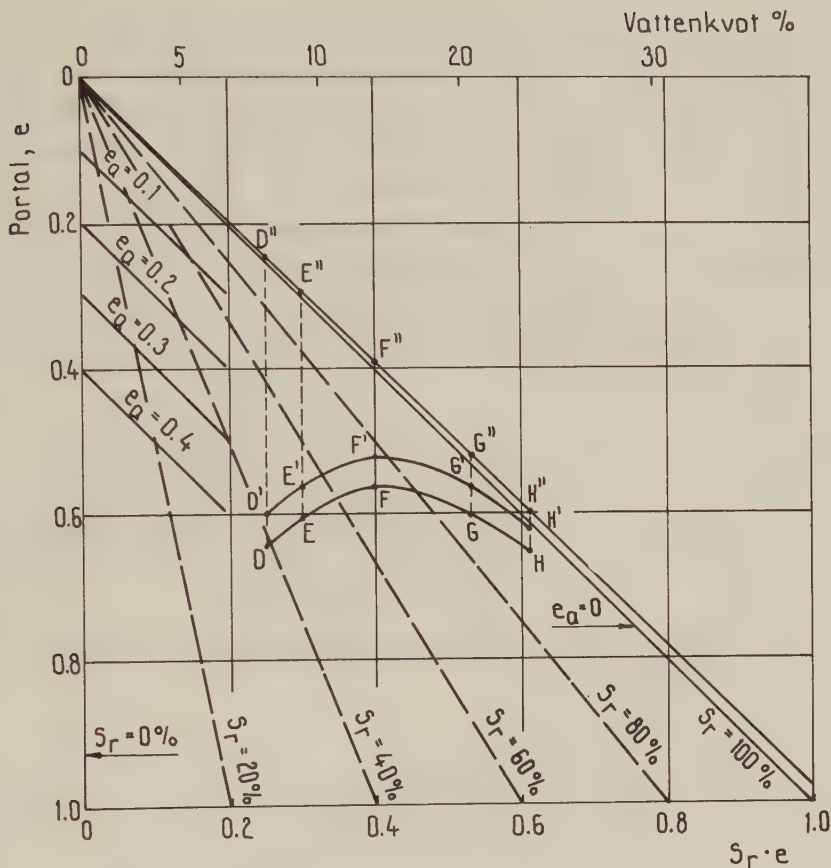


FIG 3.3 Packningskurvor vid olika packningsarbete.
(efter Hilf)

Ohta & Hata (1977) menar att en packad jords hållfasthet vid givet portal och vattenkvot grovt sett är densamma oavsett om packningen gjorts statiskt eller dynamiskt. Av sina försöksresultat på siltiga jordar drar författarna slutsatsen att för en packad jord är den odränerade hållfastheten en unik funktion av förkonsolideringstrycket oavsett initiiellt portal och vattenkvot. Författarna redovisar en stor mängd försöksresultat där en siltig sand ($d_{50} = 0.58 \text{ mm}$) konsoliderats och

därefter skjuvats i en skjuvbox. Skjuvningen har skett under konstant volym.

Initiellt portal och vattenkvot har varierats. Den under konsolideringen erhållna portalsförändringen visade sig vara avhängig av den initiella vattenkvoten, fig 3.4. Dock visade de efterföljande skjuvförsöken att uppnådd hållfasthet endast berodde av förkonsolideringstrycket, så att $\tau_f = 0.3 \cdot \sigma'_c$. Dessa resultat i kombination med den inledande ansatsen om ekvivalens mellan statisk och dynamisk packning leder fram till fig 3.5.

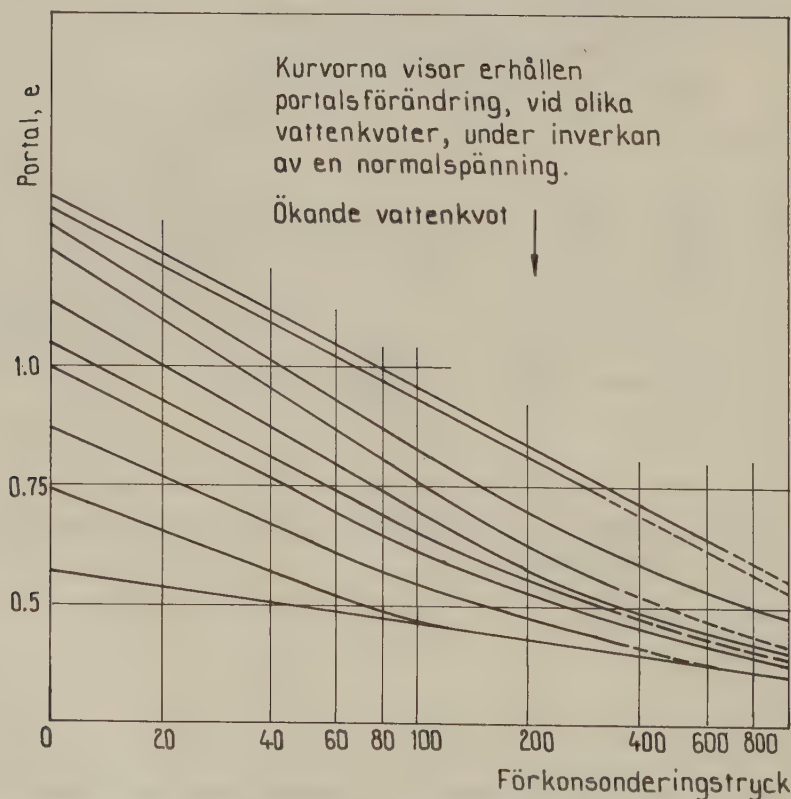


FIG 3.4 Erhållet portal som funktion av vattenkvot och applicerad spänning vid statisk packning. (efter Ohta & Hata)

Med hjälp av diagrammet kan ett förkonsolideringstryck för dynamisk packad jord bestämmas. Med detta tryck känt kan sedan skjuvhållfastheten bestämmas. För en specifik jord är det således möjligt att förutsäga det portal som kommer att uppnås

vid packning vid viss vattenkvot med ett visst bestämt packningsarbete. Omvänt gäller då att ett portal uppnått vid en specifik ursprunglig vattenkvot upplyser om förkonsolideringstryckets storlek, vilket i sin tur ger skjuvhållfastheten.

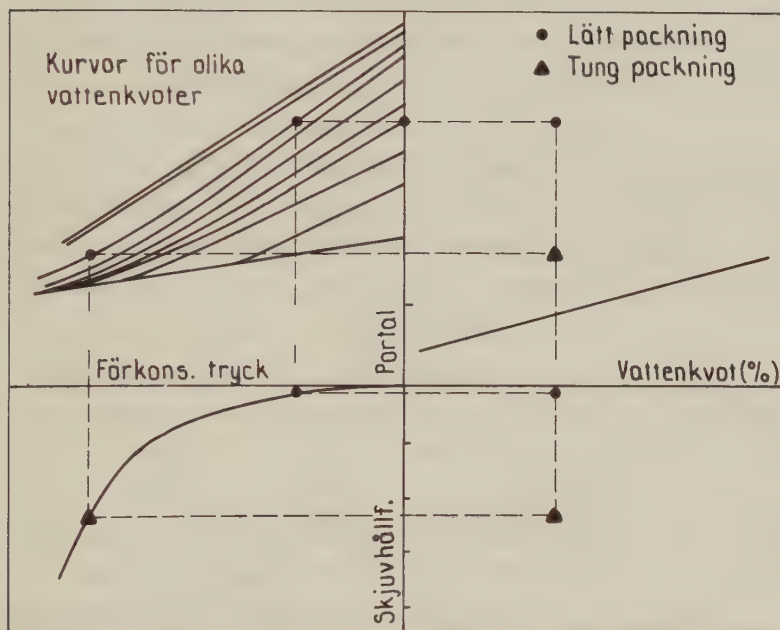


FIG 3.5 Packad jords hållfasthet som funktion av vattenkvot vid packningen och mängden packningsarbete.
(efter Ohta & Hata)

Hartleñ (1974) fann att den odränerade skjuvhållfastheten för naturlig lermorän bäst bestämdes genom enaxiella tryckförsök på dynamiskt laboratoriepackade provkroppar. Genom försök på lermoräner med olika lerhalt, vattenkvot och portal så kunde Hartleñ ge ett samband för bestämning av den odränerade skjuvhållfastheten för dessa jordar.

$$\tau_{fu} = 18.0 \cdot w^{-2.05} \cdot e^{-1.88} \cdot \left(\frac{c}{c} \right)^{2.66} \quad (3.2)$$

där

$$17 < l < 32 \% \text{ och } 7 < w < 20 \% \text{ samt } 0.29 < e < 0.82$$

_c

Hartleⁿ fann även att plattbärigheten för naturliga lermoräner bäst bestäms utifrån den odränerade skjuvhållfastheten erhållen genom enaxiella tryckförsök om lerhalten låg runt 30 %. För lerhalter runt 15 % skall de dränerade parametrarna användas och bestämmas genom triaxialförsök på inpackade provkroppar. Dock erhålls genom detta förfarande en underskattning av den naturliga lermoränens kohesion.

Bell (1977) redovisar försök utförda på en sandig siltig lera med 61 % finjordshalt, flytgränsen $w_L = 24\%$ och plasticitetsgränsen $w_p = 19\%$. Författaren packade in jord med tre olika packningsmetoder, nämligen

- stampning
- statiskt
- knådning

Packning enligt stampningsmetoden skedde vid tre olika energinivåer. För varje energinivå varierades stampens tyngd och fallhöjd samt slag per lager. Torrdensitet och odränerad skjuvhållfasthet bestämdes för varje kombination. Dessutom bestämdes erforderligt packningsarbete för att med de två andra metoderna uppnå samma torrdensitet som vid stampningen.

Resultaten visar att vid stampningspackningen erhöles den högsta torrdensiteten med den tyngsta hammaren vid lägsta hastigheten (fallhöjden). Denna kombination motsvarade den högsta energin per slag. Den högsta hållfastheten erhöles dock med en medeltung hammare med hög hastighet (fallhöjd).

På basis av erhållna försöksdata drar författaren följande slutsatser:

- statisk packning är under alla vattenkvotsförhållanden den mest effektiva metoden för att uppnå en bestämd torrdensitet

- den optimala vattenkvoten är den lägsta vattenkvot vid vilken omfattande skjuvning uppträder under packningen

- vid packning skall eftersträvas att uppnå, men ej överskrida, det kontaktryck som orsakar omfattande skjuvning i jordmassan

Essigman et al (1978) redovisar resultat från försök med olika hammarvikt, fallhöjd och slag/lager vid packning genom instampning. Försöken utfördes på en siltig lera, $w_L = 20\%$ och $I_p = 6\%$. Vattenkvoten vid instampningarna varierades inom ett brett intervall så att punkter erhöles på såväl torra som våta sidan. Enaxiella tryckförsök visar att den odränerade skjuvhållfastheten på den torra sidan, tillväxer starkt med ökande packningsarbete vid oförändrad vattenkvot. En ökning av packningsarbetet med en faktor 7 resulterade vid vattenkvoten 8 % i en ökning av hållfastheten med en faktor 6. Vid packning på våta sidan gav motsvarande ökning i packningsarbete inte upphov till någon signifikant ökning av hållfastheten. Vid packning på torra sidan resulterade en ökning i packningsarbetet i en minskad spridning i torrdensitet men en ökad spridning i hållfasthet. Någon förklaring till detta ger ej författarna men en trolig förklaring är att den ökade fastheten resulterar i ett sprödare brott.

Författarna framhåller att deras försöksresultat stöder tesen att "Aggregaten snarare än de enskilda partiklarna är de viktigaste strukturella enheterna."

Kumar & Weber (1974) redovisar försök med packning av en lerjord i en för ändamålet framtagen triaxialutrustning. Finjordshalten i leran var 77 %. Dess flytgräns var $w_L = 54.8\%$ och plasticitetsgränsen $w_p = 23.5\%$. Leran packades in till låg densitet i ett delbart kärl så att prismatiska provkroppar med sidan 56 mm och höjden 100 mm erhöles. Dessa placerades i en triaxialapparat där huvudspänningarna kunde regleras individuellt. Volymförändringar hos provkropparna bestämdes under

inverkan av såväl isotropa som deviatoriska spänningstillstånd. Följande slutsatser drar författarna på basis av sina försöksresultat:

- under inverkan av ett allsidigt tryck existerar ett linjärt förhållande mellan skrymdensiteten och logaritmen för trycket

- volymändringen erhållen under ett deviatoriskt spänningstillstånd är inte unikt kopplad vare sig till den maximala skjuvspänningen eller den oktraediska spänningen, utan till en "packningsskjuvspänning" som författarna definierar

$$\tau_{\text{pack}} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 + k(\sigma_1 - \sigma_2)/2 \quad (3.3)$$

där k är en konstant vars värde författarna bestämt till 0.5. Vid packningen förutsättes jordpartiklarna röra sig utmed de i fig 3.6 visade planen. De skjuvspänningar som orsakar dessa rörelser är då $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ och $(\sigma_1 - \sigma_2)/2$.

- för en deviatorspänning påförd vid en viss medelspänning σ_m råder ett linjärt förhållande mellan erhållen volymsändring och den tidigare definierade packningsskjuvspänningen τ_{pack} , så att

$$dV = m \tau_{\text{pack}} \quad (3.4)$$

där

$$m = 11.5 \sigma_m^{-0.957} \quad \text{för den undersökta leran.}$$

- av ekv (3. 3) framgår att volymändringen är störst när $\sigma_2 = \sigma_3$ och minst när $\sigma_2 = \sigma_1$

- en upprepad av- och pålastning utefter den ursprungliga spänningsvägen ökar packningen

- en rotation av huvudspänningarna 90° ökar packningen

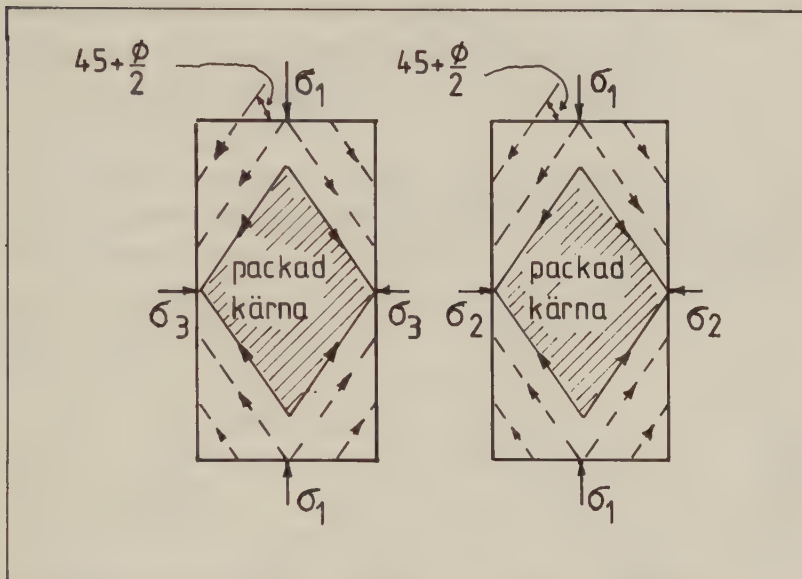


FIG 3.6 Planen utmed vilka partiklarna förutsättes röra sig vid packning under ett deviatoriskt spänningstillstånd.
(Kumar & Weber)

Struktur

Skillnaden i hållfasthet och kompressibilitet mellan en och samma jord men packad på olika sidor om den optimala vattenkvoten har av de flesta tillskrivits skillnaden i struktur. Hurvida skillnaden ligger i mikro- eller makrostrukturen har det dock rådit delade meningar om.

Lambe (1958) tillskrev skillnaderna en olikhet i mikrostrukturen, fig 3.7. På torra sidan erhåller de flakformade lerpartiklarna en slumpmässig orientering med en flockig struktur som följd. På våta sidan erhålls däremot en parallellställning av partiklarna (med sina vattenskikt) varför en välordnad struktur erhålles.

Senare undersökningar har inte kunnat verifiera Lambes skillnader i mikrostruktur men väl konstaterat skillnader i porstorleksfördelning.

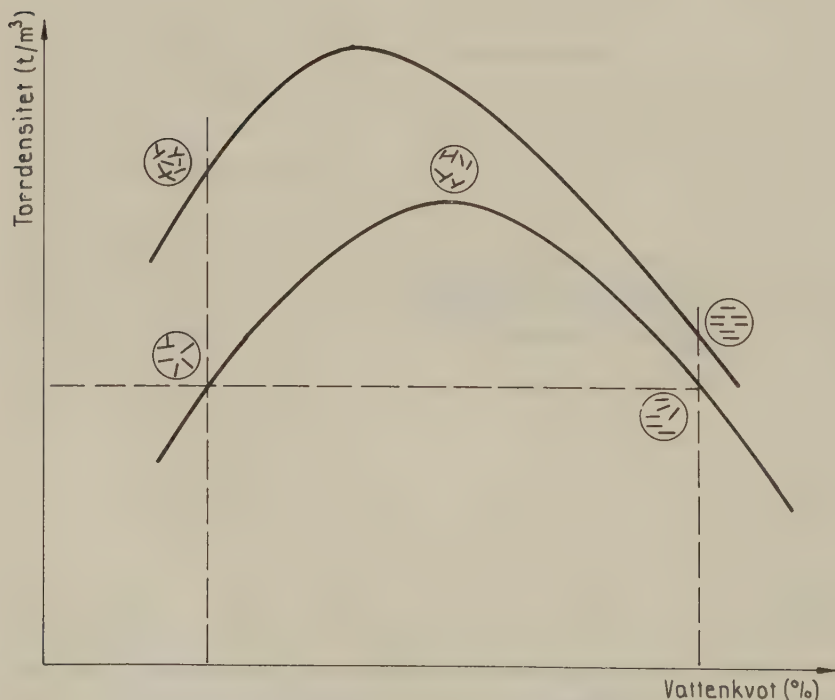


FIG 3.7 Partikelorientering vid packning på torra respektive den våta sidan.
(efter Lambe)

Ahmed et al (1974) utförde försök på en illit packad såväl på den torra som den våta sidan. Tre olika packningsmetoder användes för att packa provkropparna. Dessa var

- instampning enligt lätt laboratoriestampning
- knådning enligt Havard Miniature Compaction
- statisk enligt Sridharan

För var och en av de tre packningsmetoderna bestämdes erhållen porstorleksfördelning samt den odränerade tryckhållfastheten genom enaxiella tryckförsök, vid olika vattenkvot.

Försöken visade att de olika packningsmetoderna gav samma porstorleksfördelning men att skillnaderna var stora mellan våta och torra sidan. Ökande vattenkvot gav upphov till en ökad förekomst av porer i storleksintervallet ($0.016-0.5 \mu\text{m}$), fig 3.8. Hållfastheten var i allmänhet 50 % större på den torra än den våta sidan. Den lägsta hållfastheten erhöles för prover knådpackade på våta sidan.

Ahmed et al fann att den stora skillnaden i struktur mellan jord packad på torra respektive den våta sidan utgjordes av den procentuella andelen fina porer, fig 3.8 a och b. De indelade porstorlekarna i tre klasser

- grova $0.6-0.05 \text{ mm}$
- medium $0.05-0.0005 \text{ mm}$
- fina $0.0005-0.000016 \text{ mm}$

För illit inpackad på torra sidan var andelen porer i den fina klassen hälften så stor som vid packning på våta sidan. Andelen grova porer var ungefär densamma på den torra som den våta sidan.

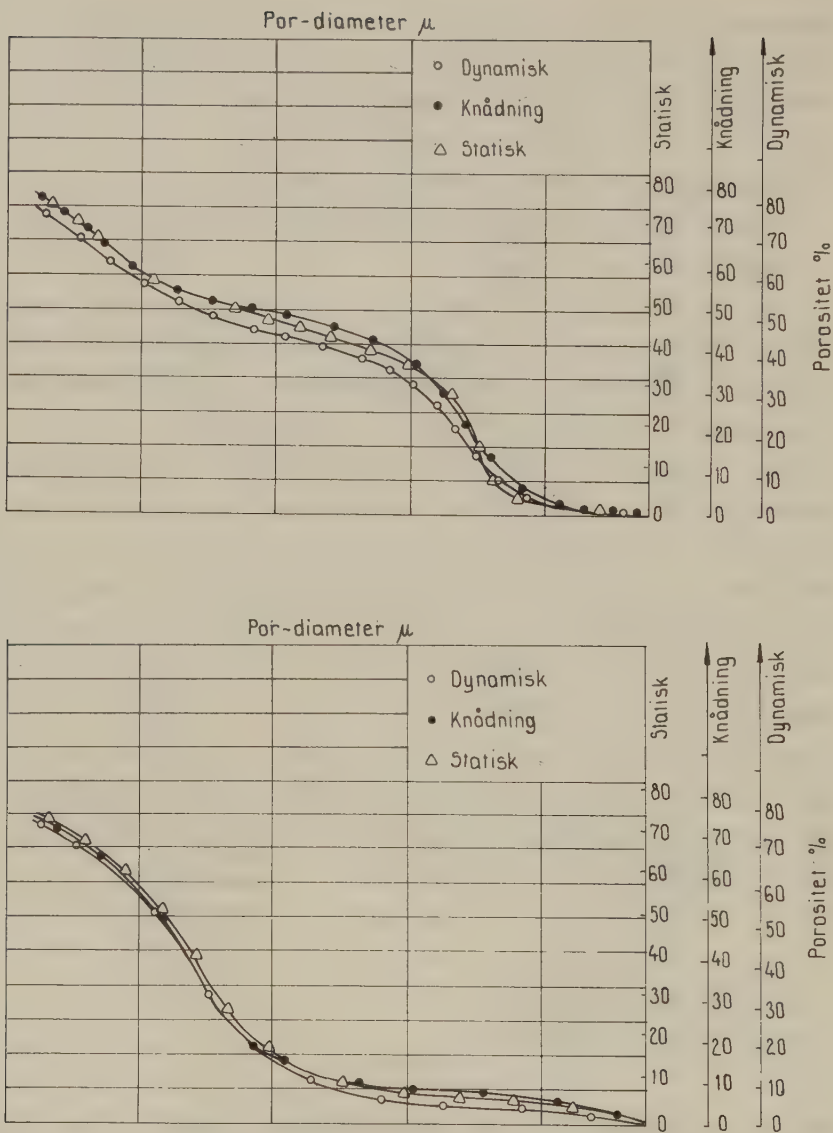


FIG 3.8 Porstorleksfördelning vid packning med olika metoder a / på torra sidan b / på våta sidan (efter Ahmed et al).

Gulhati (1976) angav att de strukturella enheterna i en packad finkorning jord utgöres av

- granulära partiklar
- "peds" dvs icke colloidala aggregat av lerpartiklar
- domäner colloidala aggregat av lerpartiklar
- lerplattor

Stödjande sig på undersökningar av Michaels (1959), Seed, Mitchell & Chan (1960) och Barden & Sides (1970) hävdar Gulhati, att en packad finkornig jords struktur är uppbyggd av en lermatris, i huvudsak bestående av domäner, med granulära partiklar och "peds" flytande i lermatrisen.

Vattenmättnings av en jord packad på torra sidan resulterar i en nedbrytning av de interdomäna krafterna vilket resulterat i en struktur som Gulhati karaktäriserar som "turbostratic".

3.4 Packad finkornig jords kompressibilitet

Väl så intressant som hållfastheten hos en fyllning av finkornig jord är dess kompressibilitet. Speciellt som tillåtna grundtryck i dessa fyllningar snarare styrs av uppkomna deformationer än av bärigheten.

Lambe (1958) angav att kompressibiliteten för en packad lerbord är starkt beroende av vid vilken vattenkvot packningen skett. Detta förklarar författaren med att olika struktur erhålles vid packning på torra respektive våta sidan. Den flockiga strukturen som erhålles vid packning på torra sidan uppvisar för låga pålagda spänningar en mycket låg kompressibilitet. Vid höga spänningar sker en partikelomlagring vilket resulterar i en avsevärt högre kompressibilitet. En annan, och kanske riktigare, förklaring till detta är att de mycket fasta klumparna spricker sönder vid höga spänningar. Jord packad på våta sidan har en dispergerad struktur vilket resulterar i en högre kompressibilitet än på torra sidan vid låga spänningar. Den ökning av kompressibiliteten som erhålles på torra sidan för höga spänningar erhålles dock inte på den våta, fig 3.9.

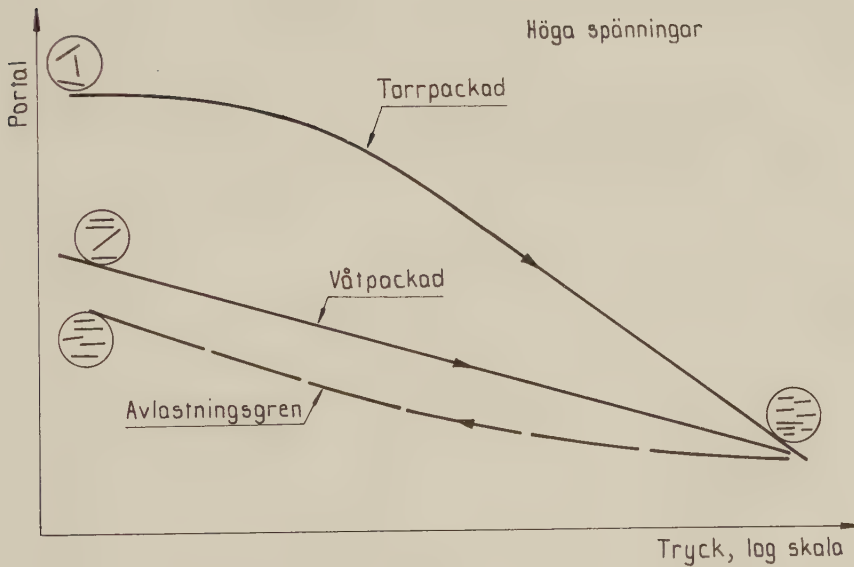
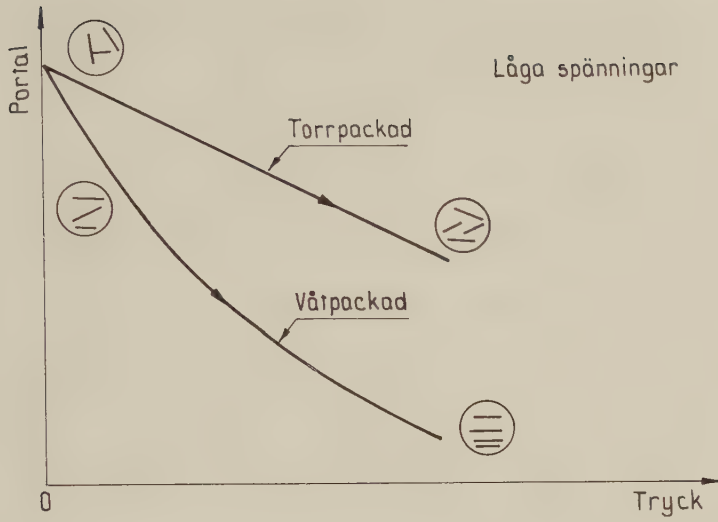


FIG 3.9 Kompressibilitet på torra och våta sidan.
(efter Lambe)

Barden (1968) redovisar resultat erhållna med kompressionsförsök för varierande spänningsväg på tre leror med olika lerhalt, 10, 18 och 50 %. Provkropparna packades vid olika vattenkvoter på båda sidor om optimum direkt i en Rowe-ödometer. Packningen utfördes antingen statistiskt eller dynamiskt med ett packningsarbete motsvarande hälften av lätt laboratoriestampning. Under kompressionsförsöken kontrollerades såväl effektivspänning som porvatten- och porgastryck. På detta sätt kunde olika spänningsvägar följas under kompressionsförsöken, fig 3.10. Barden fann att upp till 18 % lerhalt erhöles inget beroende av spänningsvägen hos kompressionen. Vid 50 % lerhalt uppträdde dock en tydlig svällning vid låga pålagda spänningar, och ibland även vid höga. Av sina försöksresultat drog Barden följande slutsatser:

- de olika strukturer som erhålles på torra respektive våta sidan har stor betydelse för kompressionsegenskaperna

- förhållandet mellan erhållen relativ volymminskning och verksamma spänningar kan formuleras enligt

$$dV/V = C_1 * d(\sigma - u_a) + C_2 * d(u_a - u_w) \quad (3.5)$$

där C_1 och C_2 endast beror av de aktuella spänningarna.

- orsaken till spänningsvägsberoende hos kompressionen är troligen den hysterisis som finns i vattenmättnings- kontra uttorkningsprocessen

- sugning orsakar en förstyvning av det flockiga men inte det dispergiva skelettet

- för att kollaps skall uppträda i jordskelettet vid belastning krävs att följande tre villkor är uppfyllda

1 -en potentiellt ostabil struktur såsom den som erhålles vid packning på torra sidan

2 -en hög pålagd spänning

3 -stor sugning vilken ger strukturen en temporär stabilitet som försvinner vid vattenmättning

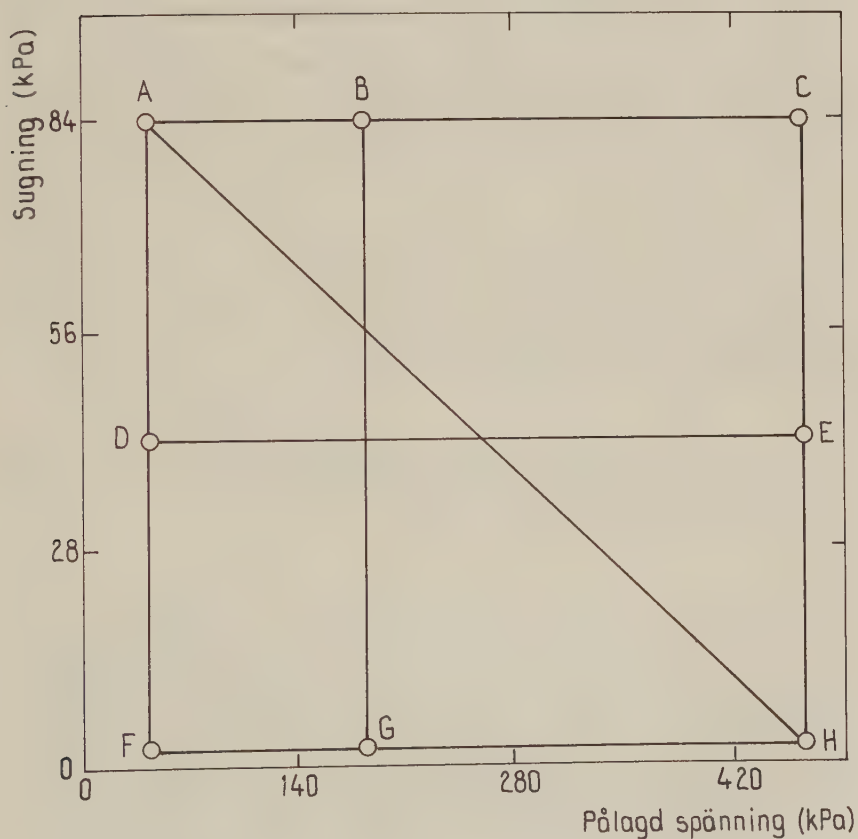


FIG 3.10 Olika spänningsvägar vid kompressionsförsök.
(efter Barden)

Hilf (1975) rapporterar om försök utförda vid Bureau of Reclamation 1952 på en silt med flytgränsen $w_L = 27.1\%$ och $I_p = 4.8\%$. Försöken visade att jord packad 2 % på torra sidan uppvisar lägst kompression vid såväl mättat som omättat tillstånd, tabell 3.1. Om jorden var alltför torr vid packningen så erhöles kollaps vid vattenmättnig. Att kollapsen inträffar förklarar Hilf med att de ofta rådande höga kapillära spänningarna ger upphov till höga effektivspänningar. Under inverkan av en yttre pålagd last kan därför spänningstillståndet i jorden åskådliggöras med spänningscirkel 1, fig 3.11. Om sedan jorden bereds möjlighet att ta upp vatten så kommer spänningscirkeln att translatera utmed spänningsaxeln i riktning mot origo, cirkel 1'. Den kan därvid komma att genomskära brottenvelopen vilket ger sig tillkänna som en kollaps.

Hilf menar att kollaps kan inträffa även om nr 2 av de av Barden uppställda villkoren för kollaps ej är uppfyllt, om istället torrdensiteten är mycket låg.

Tabell 3.1 Uppmätt volymsförändring hos en silt packad på torra respektive våta sidan, före och efter vattenmättnig, (efter Hilf).

Packningsvattenkvot	γ_d	w	S%	Pålagd spänning (kPa)					Vattenmättnig
				263	525	1050	2100	2100	
4 %-enheter på torra sidan	105.5	13.0	59.6	1.2	1.7	2.6	5.5	8.0	
2 %-enheter på torra sidan	108.3	15.2	74.8	1.4	2.1	3.4	5.6	5.6	
Optimal vattenkvot	109.7	17.4	88.4	3.6	4.5	5.9	7.9	7.9	
2 %-enheter på våta sidan	107.4	19.4	93.4	3.8	5.0	6.5	8.5	8.6	

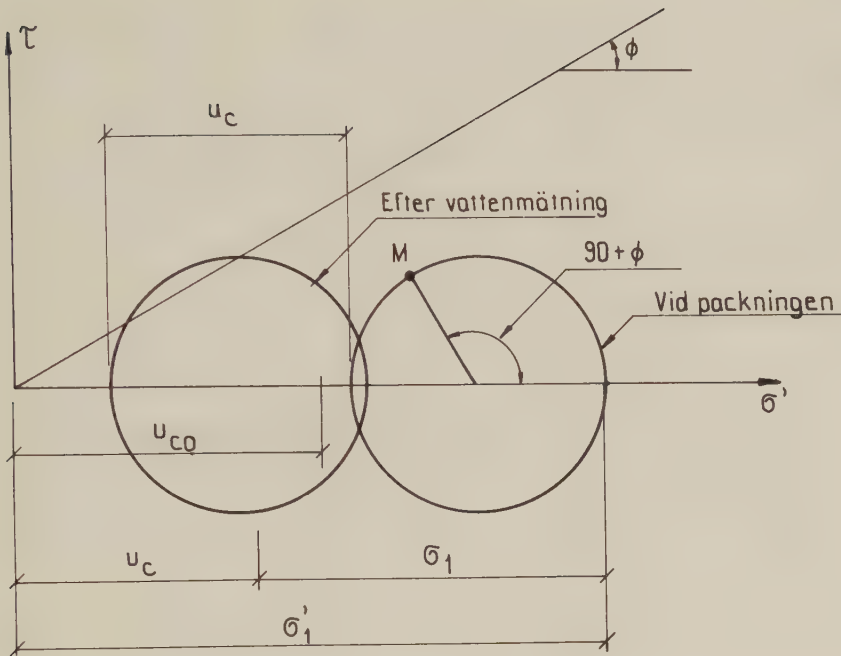


FIG 3.11 Spänningstillstånd i jorden vid packning på torra sidan, före och efter vattenupptagning. (efter Hilf)

Ingles & Williams (1980) behandlade teoretiskt och empiriskt storleken på de sättningar som kan uppstå genom kollaps av strukturen vid vattenupptagning av en finkornig jord packad på torra sidan. I fig 3.12 visas packningskurvan som svarar mot det utförda packningsarbetet p_1 och packningskurvan motsvarande den i fyllningen rådande spänningen p_2 .

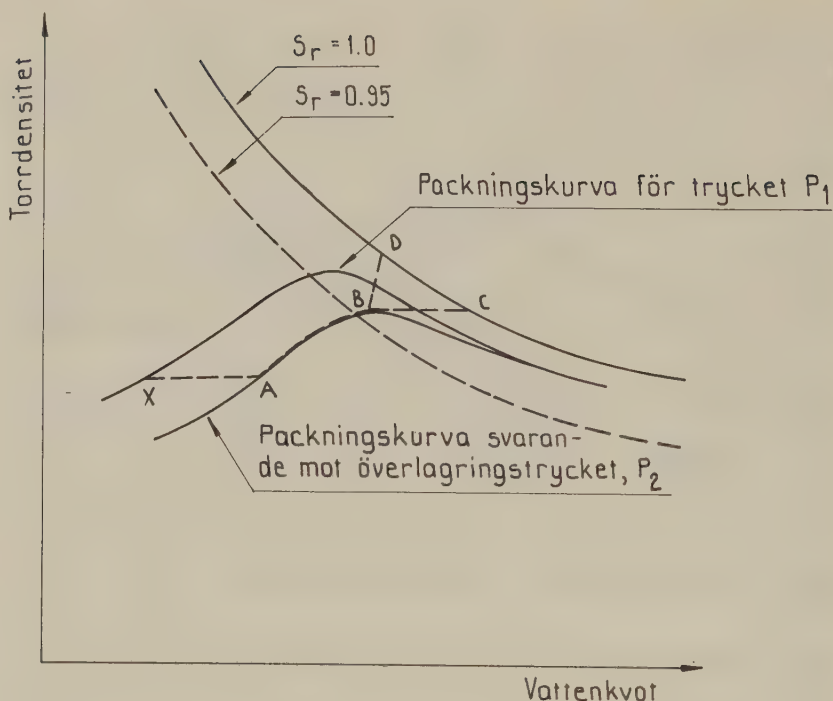


FIG 3.12 Densitetsförändringar i en jord packad på torra sidan med ett packningsarbete motsvarande trycket p_1 , under fri tillgång på vatten, och under inverkan av det aktuella överlagringstrycket p_2 . (efter Ingles & Williams)

Om packning skett vid en vattenkvot sådan att punkten X beskriver tillståndet i fyllningen, så kan denna vattenkvot, vid tillgång på vatten, ändras till punkten A utan att några sättningar inträffar. Finns tillgång till ytterligare vatten kommer därefter genom omlagringar tillståndet att ändras följande packningskurvan för p_2 upp till punkten B. Förändringen från A till B medför att sättningar uppträder. Om tillståndet därefter skall ändras till punkten C eller D avgörs av jordmaterialiets struktur. För ex vis en sand är det troligaste att sluttillståndet beskrives av punkten C, medan punkten D är troligare för en dispergiv lera. Den sättning som uppstår utmed BD kan högst uppgå till mellan 3 och 5 % eftersom packningskurvans optimum för de flesta jordar är belägen mellan linjerna för 3 och 5 % luftfyllda porer. Sättningen utmed AB är beroende av förhållandet mellan ekvivalent packningstryck

och aktuellt tryck i fyllningen. Är skillnaden mellan ekvivalent packningstryck och aktuellt tryck i fyllningen tillräckligt stor (små fyllningshöjder) så representerar punkten X en högre torrdensitet än punkten B varför denna del av sättningen blir noll.

Vidare görs en jämförelse av denna teori med resultat från försök på en siltig sand och en siltig lera. Inte i något av de två materialen erhöles någon kollaps vilket författarna tillskriver materialens skjuvhållfasthet.

Av sina erhållna resultat drar författarna slutsatsen att packning kan utföras på torra sidan utan risk för kollaps, förutsatt att det ekvivalenta packningstrycket är minst 3 ggr större än det förväntade överlagringstrycket.

3.5 Kontroll av packad finkornig jord

Den totala kontrollinsatsen vid fyllningsarbeten sönderfaller vanligen i två separata delar, nämligen

- utförandekontroll
- resultatkontroll

Vilken av de två delarna som är dominerande är beroende av karaktären på det aktuella arbetets specifikation. I ex vis Storbritannien och USA är det vanligt med utförande specifikationer, dvs det är föreskrivet hur packningsarbetet skall bedrivas vad avser lagertjocklekar, antal vältöverfarter och använd utrustning. I Sverige har det varit vanligare med resultatspecifikationer även om såväl SBN 80 som Mark AMA 83 anger lämpliga lagertjocklekar och erforderligt antal vältöverfarter för olika kombinationer av packningsutrustning och fyllningsmaterial. Mark AMA 83 anger 4 olika packningsklasser se tabell 3.2. SBN 80 kräver vid fyllningshöjder över 1 m att minst 90 % packningsgrad enligt tung laboratoriestampning skall uppnås för att i normen angivna metoder för bestämning av tillåtna grundtryck skall få användas.

Tabell 3.2 Packningsklasser enligt Mark AMA 83 C/5.

Klass	Utförande av fyllning och packning
1	I lager till särskilt föreskrivet resultat
2	I lager enligt tabell C/5 (tabell 3.10)
3	Traktorutbredning
4	Fyllning utan krav på packning

Den vid kontroll av packningen i grovkorniga jordar vanligaste metoden är utan motsvarighet någon form av densitetskontroll. Detta är dock en helt otillräcklig metod vid kontroll av finkorniga fyllningar eftersom vattenkvoten spelar så stor roll för resultatet. Överhuvudtaget bör kontrollinsatsen vid utförande av finkorniga fyllningar vara mer omfattande för att säkerställa ett gott resultat.

Frost (1973) visar i vilken grad, enligt hans erfarenhet, olika faktorer påverkar kvaliteten på fyllningsarbetena, tabell 3.3-3.4 och fig 3.13.

Tabell 3.3 Olika omständigheters betydelse för packningsresultatet i finkornig jord, (efter Frost).

Omständighet	Arbetsförhållande	Control Sub Factor					
		0	1	2	3	4	5
1	Erforderlig konditionering i andelar av optimal vattenkvot			Liten (0-1/4)	Medel (1/4-1/2)	Stor (1/2)	
2	Erforderlig packningsgrad		Låg (<95%)	Medel (95-100%)	Hög (>100%)		
3	Packningsredskapens lämplighet			Mer än erforderlig	Erforderlig	Mindre än erforderlig	
4	Entreprenörens kontroll av fyllningsarbetet		God		Medel		Dålig
5	Utförandekontroll	God	Medel	Dålig			
6	Variationer i fyllningsmaterial	Låg	Medel	Hög			
7	Spridning av använd kontrollmetod		Låg (<2)	Medel (2-4)	Hög (>4)		

Frost anger sju omständigheter som i olika utsträckning påverkar slutresultatet. Varje sådan omständighet har tilldelats värden på "Control Subfactor". Värdet på denna faktor beror för varje omständighet på de aktuella förutsättningarna. Genom att, för ett aktuellt fyllningsarbete, välja

värde på denna faktor, omständighet för omständighet, så kan slutligen dessa summeras. Det lägsta möjliga värdet, 7, innebär att slutresultatet blir bästa möjliga medan maximivärdet 23 anger en dålig slutprodukt, fig 3.13.

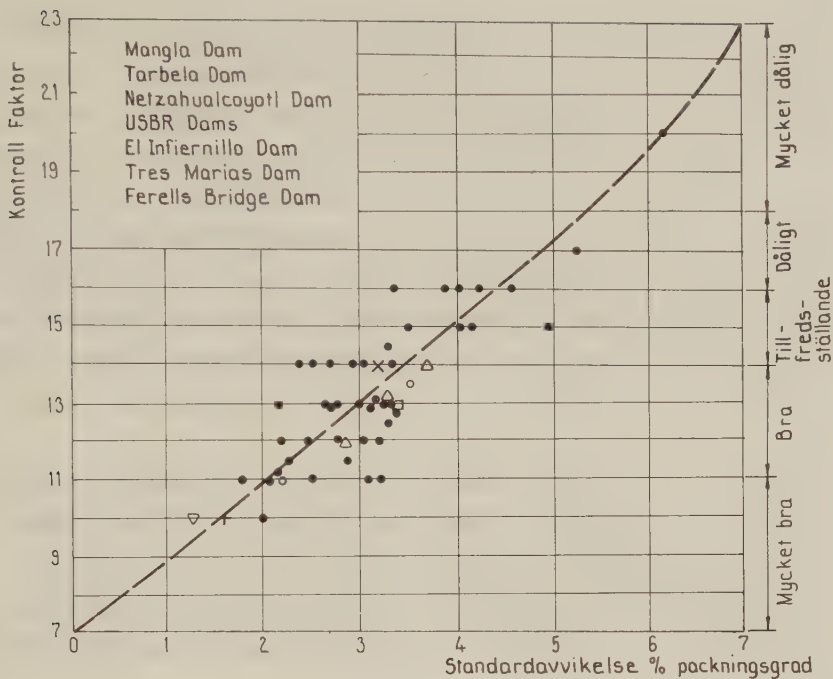


FIG 3.13 Packningsgradens standardavvikelse som funktion av "Control Factor".
(efter Frost)

tabell 3.4

Tabell 3.4 Fyllningskvalitet som funktion av Control Factor, (efter Frost).

Förhållanden (1)	Control Factor (2)	Packningsgradens standardavvikelse % (3)
Mycket goda	7-11	0-2.2
Goda	12-14	2.3-3.5
Tillfreds- ställande	15-16	3.6-4.5
Dåliga	17-18	4.6-5.4
Mycket dåliga	19-23	>5.5

En riktigt fungerande utförandekontroll är av mycket stor vikt för slutresultatet. För att utförandekontrollen skall fungera bra krävs av den att den kontrollerar rätt parametrar samt att den gör det snabbt. Jordmassor som är för torra eller våta för att medge ett gott resultat skall avvisas så att de aldrig hamnar i fyllningen. En långsamt fungerande kontrollmetod som slår larm först sedan jordmassorna både lagts ut och packats orsakar irritation på arbetsplatsen förutom att pengar går förlorade. Därför är en direkt vattenkvotskontroll ingen bra metod.

Parson (1978) beskriver en vid Transport and Road Research Laboratory i Storbritannien utvecklad metod för att snabbt avgöra ett jordmaterials lämplighet för fyllningsändamål. Metoden bygger på det faktum att en ökning av packningsarbetet vid packning på våta sidan, inte nödvändigtvis resulterar i en högre densitet, fig 3.14.

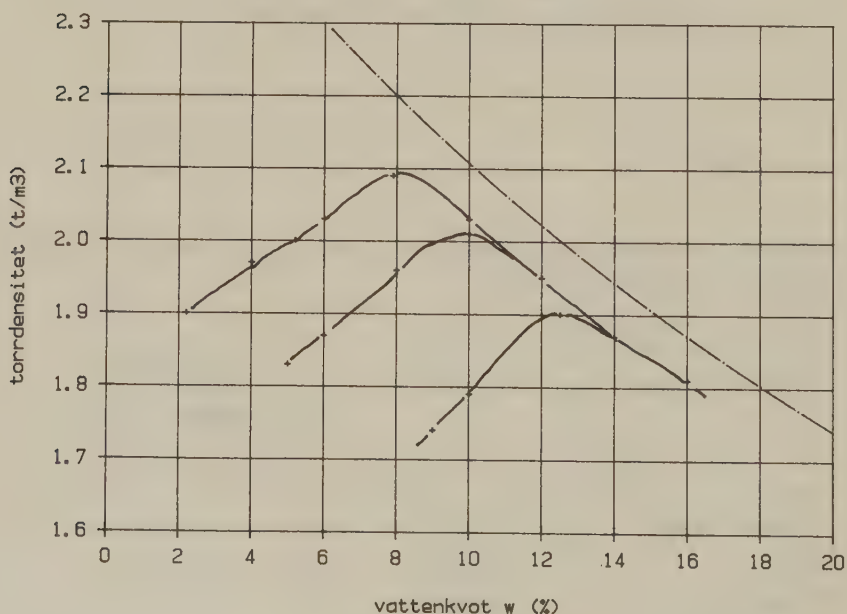


FIG 3.14 Erhållen torrdensitet som funktion av mängden packningsarbete vid olika vattenkvot, (efter Parsons).

Den använda utrustningen består av ett kärl med innerdiametern 100 mm. En 7 kg tung fritt fallande hammare träffar jorden i kärlet. Hammarens intryck i jorden kan mätas med stor noggrannhet. Genom att beräkna skillnaden i intryck mellan N och $4 \cdot N$ antal slag och avsätta detta värde mot N så erhålles ett samband mellan intryckets storlek och antal slag, fig 3.15. Om antalet slag logaritmeras så blir detta samband linjärt. Skärningen mellan denna linje och linjen svarande mot 5 mm intryck ger det antal slag som svarar mot MCV (Moisture Condition Value) enligt sambandet

$$MCV = 10 \cdot 10^{\log N - 5} \quad (3.6)$$

Genom att upprepa försöket vid olika vattenkvoter för en och samma jord kan ett samband etableras mellan MCV och vattenkvoten, fig 3.16, enligt

$$w = a - b \cdot MCV \quad (3.7)$$

där

a = vattenkvoten när $MCV = 0$

b = linjens lutning (vilken visar vattenkänsligheten)

Enligt Parsons kan specifikationen vid ett fyllningsarbete vara baserat på MCV. Ett lämpligt värde på MCV är 8, vilket motsvarar $N = 6$. För att ett jordmaterial skall vara lämpligt så skall således skillnaden i intryck mellan $4 \cdot 6 = 24$ och 6

slag' vara minst 5 mm. Parsons visar även att ett starkt samband råder mellan MCV och den odränerade skjuvhållfastheten.

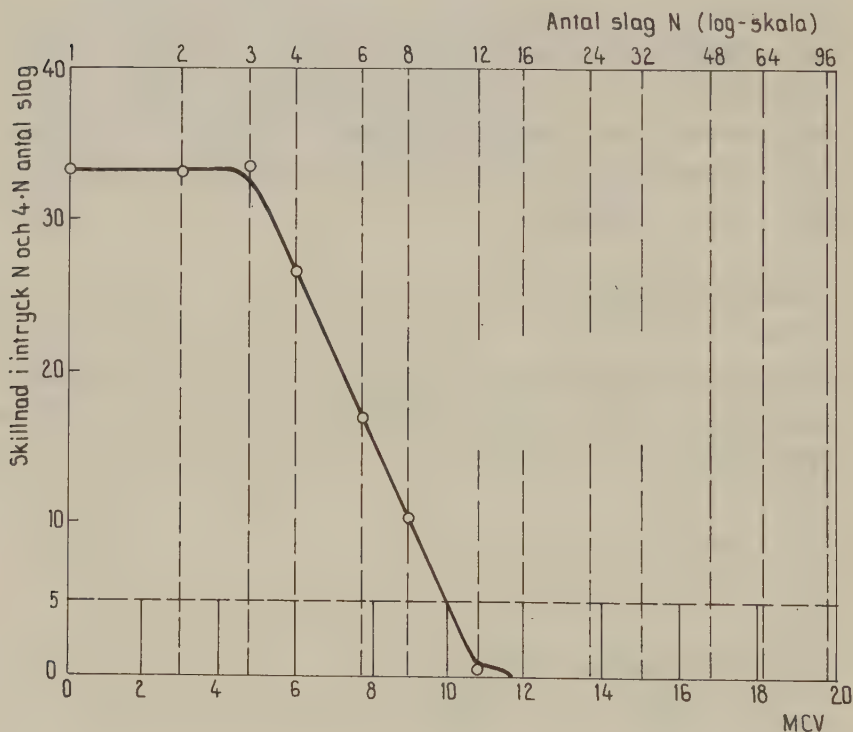


FIG 3.15 Intryckets storlek som funktion av antal slag vid packning i "Moisture Condition Apparatus", (efter Parsons).

Även om en omfattande utförandekontroll genomförts i samband med fyllningsarbetenas gång så måste vanligtvis en resultatkontroll genomföras för att ge upplysningar om den färdiga fyllningens tekniska egenskaper. Speciellt om fyllningen skall tjäna som undergrund till byggnadsobjekt av olika slag. Helt naturligt har då samma metoder som användes i naturlig jord kommit till användning vid resultatkontrollen. För svenska

förhållanden innebär det att ving-, vikt- och trycksondering företrädesvis utnyttjats. Då kvarstår dock svårigheten att översätta resultaten från sonderingarna till upplysningar om fyllningens hållfasthet och kompressibilitet.

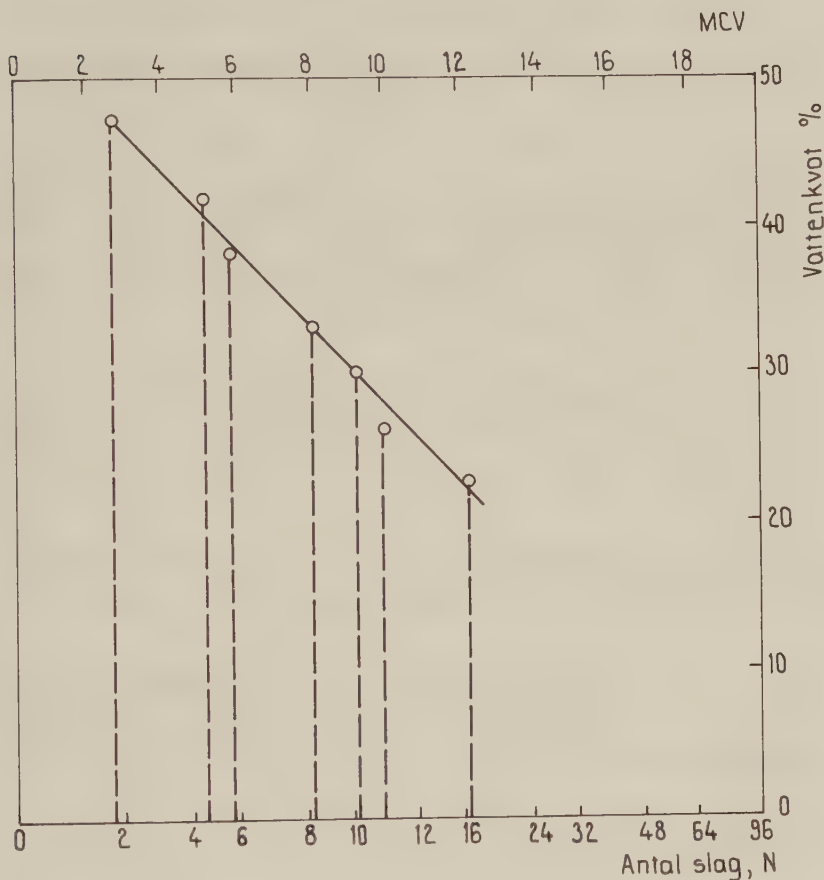


FIG 3.16 Samband mellan vattenkvot och MCV (Moisture Condition Value), (after Parsons).

En sammanställning av de olika teorier för, och erfarenheter av, trycksondering (CPT) som existerar, har gjorts av

Schmertman (1978), i "Guidelines for Cone Penetration Test".
Följande synpunkter är hämtade ur denna skrift.

Trycksondering är pga sin relativt stora spets inte lämpad för packningskontroll av de översta 0.3 metrarna. Däremot är den väl lämpad för packningskontroll mot djupet. Dock måste alltid det erhållna värdet på spetstrycket q_c korreleras lokalt med de sökta storheterna såsom torrdensitet, CBR (California Bearing Ratio) etc. Framförallt påverkas spetstrycket starkt av storleken på de horisontella spänningar som packningen orsakar i fyllningen. Dessa horisontella spänningar kan försvinna med tiden om fyllningen har fria ränder, eller så kan de utlösas vid schaktning i fyllningen.

Den odränerade skjuvhållfastheten kan utvärderas ur sambandet

$$\tau_{fu} = (q_c - g \cdot \rho \cdot z) / N_c \quad (3.8)$$

Problemet är att bärighetsfaktorn N_c visat sig starkt påverkas av en rad faktorer och har funnits variera mellan 5 och 70.

För att, utifrån trycksondering, bedömma de sättningar som erhålles vid grundläggning kan det av Schmertmann angivna sambandet utnyttjas.

$$s = C_1 \cdot C_2 \cdot q_n^f \cdot I_z \cdot dz / (X \cdot q_c) \quad (3.9)$$

där

$$C_1 = 1 - 0.5 \cdot (g \cdot \rho \cdot D / q)$$

och

$$C_2 = 1 + 0.2 \cdot 10^{\log(t / 0.1)}$$

s = sättningen

q = grundtrycket

q = nettogrundtrycket

I_n = deformationsfördelning under plattan (enligt fig 3.17)

dz = skiktjocklek

X = en faktor med vilket spetstrycket multipliceras

q_c = spetstrycket

t = tiden uttryckt i år

Värdet på faktorn X anges i sand vara mellan 2.5 och 3.5. Erfarenheter visar dock att om jorden är förbelastad genom ex vis packning med vält så minskar sättningen mer än vad ökningen i q_c antyder, varför $5 < X < 7$ kan användas och ändå vara på säkra sidan.

I rena leror kan en sedvanlig sättningsberäkning utföras, med användande av spetstrycket för att bedömma kompressionsindex

C_c på grundval av kvoten τ_{fu} / σ' .

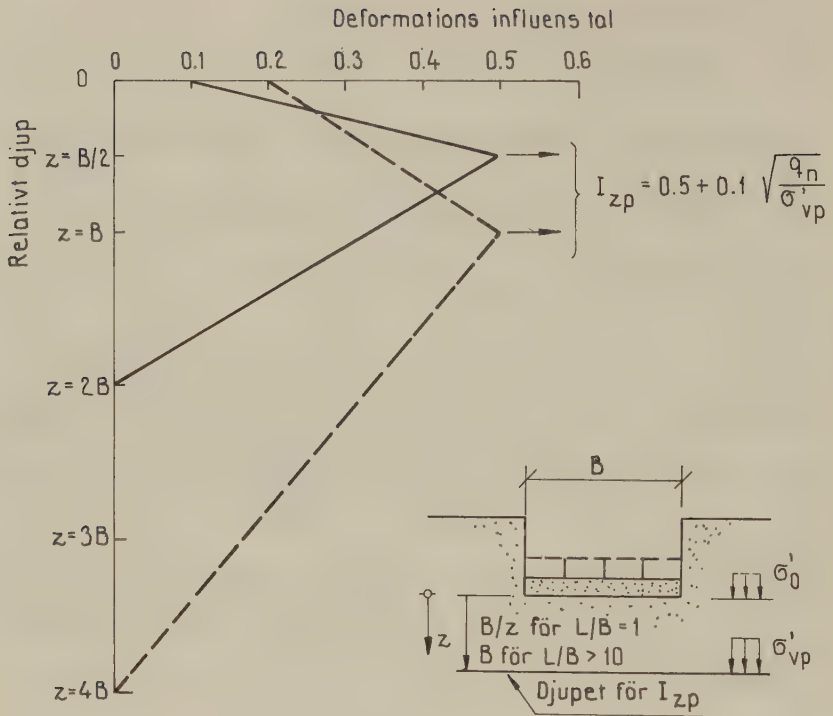


FIG 3.17 Töjningsfördelning under en platta, (efter Schmertman).

Bergdahl (1983) redovisar en sammanställning över metoder för att utifrån trycksondering beräkna uppkomna sättningar. Förutom det av Schmertmann framtagna sambandet så förekommer De Beer's och Meyerhof's samband. Dessa samband är identiska sånär som på storleken av C .

$$s = (\sum 2.3/C) * \log(\sigma'_0 + d\sigma'/\sigma'_0) dH \quad (3.10)$$

där

$$C = 1.5 \cdot q_c / \sigma_0, \text{ enligt De Beer}$$

och

$$C = 1.9 \cdot q_c / \sigma_0, \text{ enligt Meyerhof}$$

Gemensamt för de tre redovisade metoderna är att de utvecklats för att bestämma sättningarna i friktionsmaterial.

Hansbo (1972) redovisar Jaky's närmemetod för beräkning av sättningar under en platta. Spänningen på djupet z av plattbelastningen q antas avta med djupet, och är lika med q vid $z=0$. På djupet $z=d_0$ är spänningen $\sigma_z=0$. För en cirkulär eller kvadratisk platta är $d_0=b$, där $b=z$ plattbredden (platt-diametern). För en cirkulär platta kan således sättningen beräknas ur uttrycket

$$s = q \int (1-z/b) / M \, dz \quad (3.11)$$

för ett konstant värde på kompressionsmodulen, M , erhålles

$$s = q \cdot b / (2 \cdot M) \quad (3.12)$$

Av de samband som angivits i detta avsnitt är förmodligen De Beer's och Meyerhof's samband svårast att använda i packad jord pga att jordens förkonsolideringstryck ingår i uttrycken. I kap. 8 redovisas jämförelser mellan uppmätta och med Schmertman's respektive Jaky's samband berräknade sättningar.

3.6 Metodik vid packningskontroll

Syftet med utförandekontroll är att tillse att fyllningsarbetena bedrivs på sådant sätt att "bästa möjliga" resultat uppnås. Oavsett vilken metod som användes för själva kontrollen måste alltid frågan "Skall resultatet godkännas eller måste ompackning utföras?" kunna besvaras. Det är därför viktigt att metodiken vid kontrollen är sådan att denna fråga kan ges ett entydigt och rättvisande svar.

Resultatet från alla repetitiva processer innehåller spridning. Denna spridning försvårar analysen av resultaten. En enda observation av verkligheten ger väldigt lite upplysningar, pga att verkligheten är en, eller flera, nära nog oändliga populationer, vilka kan karaktäriseras med ett medelvärde och en standardavvikelse. Denna enda observation har inte möjlighet att upplysa om populationens utseende. Med ytterligare en observation så kan förvisso ett medelvärde och en standardavvikelse beräknas, men dessa representerar inte populationen utan är stickprovets medelvärde och standardavvikelse. Görs stickprovet så stort att det omfattar hela populationen så sammanfaller stickprovets medelvärde och standardavvikelse med populationens, förutsatt att den använda observationsmetoden i sig inte innehåller några systematiska eller slumpmässiga fel. Eftersom det är orimligt att arbeta med stickprov som omfattar hela populationer krävs en mer utvecklad metodik. Denna finns utvecklad för kvalitetskontroller inom den stationära industrin.

Frost (1973) visar på en teknik som utvecklats av Grant för att kunna jämföra stickprovsmedelvärden med populationsmedelvärdet. Metoden innebär att populationsmedelvärdet uppskattas mha ett antal stickprov.

Under en tidsperiod, då produktionen håller sådan kvalitet att man är nöjd om denna kvalitet kan upprätthållas i ett fortvarighetstillstånd, så tas ett antal stickprov om vardera n

stycken observationer. Alla observationer inom ett stickprov måste utföras av en och samma observatör. Några observationer som inte ingår i det aktuella stickprovet, får ej utföras inom tidsrymden för den första till den sista observationen i stickprovet. För vart och ett av de N stycken stickproven beräknas medelvärde och standardavvikelse. Därefter beräknas medelvärdenas medelvärde, $\bar{x}$ och standardavvikelse, s . När dessa är kända kan konfidensintervall för populationens medelvärde och standardavvikelse beräknas.

$$\bar{m} = \bar{x} \pm a \cdot s \quad (3.13)$$

$$s = b \cdot s \text{ till } c \cdot s \quad (3.14)$$

där

a , b och c beror av stickprovets storlek enligt tabell 3.5.

Med värden på a , b och c enligt tabell 3.5 fås en intervallbredd sådan att det sanna medelvärdet och sanna standardavvikelsen med 99 % sannolikhet ligger i intervallet. Ett enskilt värde, som i samband med packningskontroll, ligger lägre än $\bar{x} - a \cdot s$ tillhör således med 99 % sannolikhet inte populationen och skall medföra att ompackning utföres inom den del av fyllningen som värdet representerar.

Tabell 3.5 Värderna på faktorerna a, b och c i ekv 3.13 och 3.14 som funktion av stickprovsstorlek, (efter Frost).

Antal observationer i ett stickprov (1)	Faktorer		
	a (2)	b (3)	c (4)
2	3.76	0	3.27
3	2.39	0	2.57
4	1.88	0	2.27
5	1.60	0	2.09
6	1.41	0.03	1.97
7	1.28	0.12	1.88
8	1.17	0.19	1.81
9	1.09	0.24	1.76
10	1.03	0.28	1.72
11	0.97	0.32	1.68
12	0.93	0.35	1.65
13	0.88	0.38	1.62
14	0.85	0.41	1.59
15	0.82	0.43	1.57
16	0.79	0.45	1.55
17	0.76	0.47	1.53
18	0.74	0.48	1.52
19	0.72	0.50	1.50
20	0.70	0.51	1.49

Fang (1975) redogör för en annan metod för att hantera frågan om resultatet av en kontroll skall leda till att fyllningen godkännes eller underkännes. Själva tekniken presenterades, enligt Fang, av Lieberman & Resnikoff 1955 och har prövats av AASHO i samband med vägbyggnad. Nedan följer en kort beskrivning av metoden.

Dela imaginärt in den del av fyllningen som skall kontrolleras i ett antal kvadrater, ex vis 150 kvadrater med sidan 2.0 m. Numrera kvadraterna 1 till 150. Använd slumpstalstabell för att slumpmässigt välja ut de (minst 6) kvadrater där provtagning skall ske. Räkna, efter provtagningen, ut stickprovets medelvärde, $\bar{x}_m$ och standardavvikelse, s. Beräkna storheterna

$$C_u = (U - \bar{x}_m) / s \quad (3.15)$$

och

$$C_l = (\bar{x}_m - L) / s \quad (3.16)$$

U och L är den övre respektive undre gränsen för det intervall inom vilket resultatet tillåts variera. Om specifikationen säger att packningsgraden skall ligga i intervallet 90 till 95 % så är således

$$L = 90$$

och

$$U = 95$$

Tabell 3.6 Storheterna P_U och P_L som funktion av stickprovsstorlek, n , och C_U och C_L beräknade enligt ekv 3.15-16, (efter Fang).

C_U	Stickprovsstorlek				
eller	4	6	8	10	12
C_L	P_U eller P_L				
0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
0.1	46.7	45.7	45.3	46.2	46.1
0.2	43.3	42.7	42.6	42.4	42.3
0.3	40.0	39.1	38.8	38.6	38.5
0.4	36.7	35.6	35.2	34.9	34.8
0.5	33.3	32.1	31.8	31.4	31.3
0.6	30.0	28.7	28.3	27.9	27.9
0.7	26.7	25.4	25.0	24.7	24.6
0.8	23.3	22.2	21.9	21.6	21.5
0.9	20.0	19.1	18.9	18.7	18.6
1.0	16.7	16.5	16.2	16.0	15.9
1.1	13.3	13.5	13.5	13.5	15.5
1.2	10.0	10.8	11.0	11.2	11.3
1.3	6.7	8.6	8.9	9.2	9.3
1.4	3.3	6.4	6.9	7.4	7.5
1.5	0	4.5	5.2	5.9	6.0
1.6	0	2.9	3.7	4.5	4.8
1.7	0	1.6	2.5	3.4	3.6
1.8	0	0.8	1.6	2.5	2.7
1.9	0	0.5	1.2	1.8	1.8
2.0	0	0.2	0.7	1.2	1.4
2.1	0	0.1	0.4	0.7	0.9
2.2	0	0	0.2	0.4	0.6
2.3	0	0	0.1	0.2	0.4
2.4	0	0	0	0.1	0.2
2.5	0	0	0	0	0.1
2.6	0	0	0	0	0.1
2.7	0	0	0	0	0
2.8	0	0	0	0	0
2.9	0	0	0	0	0
3.0	0	0	0	0	0
3.1	0	0	0	0	0

Ur tabell 3.6 utläses därefter P_u och P_l som funktion av stickprovsstorleken, n , och C_u respektive C_l . Summan av P_u och P_l skall vara mindre än P för att leda till ett godkännande. I de fall endast en övre eller undre gräns specificerats jämförs P_u respektive P_l direkt med P och skall vara mindre än P för ett godkännande.

P är en storhet vars värde bestäms av stickprovets storlek samt storleken av den andel av hela populationen som kan accepteras få ligga utanför de angivna gränserna, kallad AQL (Acceptance Quality Level). Eftersom stickprovets medelvärde och standardavvikelse inte är detsamma som fyllningens (såvida stickprovet inte omfattar hela fyllningen, vilket är orimligt) så kan inte AQL och P vara identiska. Storleken på P erhålles som funktion av AQL och stickprovsstorleken såsom visas i fig 3.18.

I tabell 3.7 visas de av AASHO rekommenderade värdena på P , vilka baseras på AQL=20 %.

Tabell 3.7 Av AASHO rekommenderade värden på P för olika vägbyggnadsobjekt. Värdena är baserade på AQL= 20 %, (efter Fang).

Typ av byggnadsverk	Rekommenderad	Stickprovsstorlek
	P	n
Bankfyllning		
Main roadway		
Översta lagret	40	8
Övriga lager	45	8
Vändplats	50	6
Uppfartsväg	55	4
Undergrund (sand-grus)	35	8
Grund (krossad kalksten)	35	8

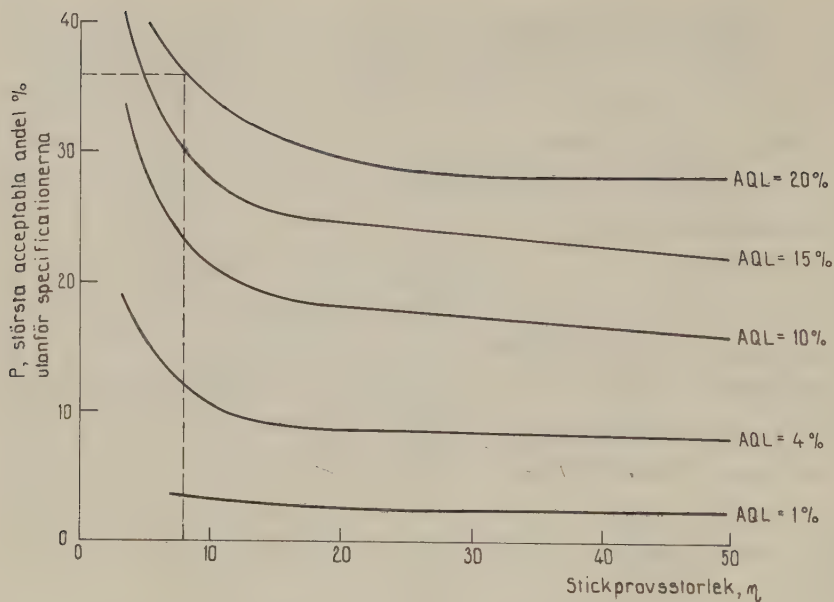


FIG 3.18 Maximal tillåten % avvikelse, P , som funktion av stickprovsstorlek, n , och AQL (Acceptable Quality Level), (efter Fang).

Fang menar att de tester som genomförts av AASHO visar att den av Lieberman & Resnikoff presenterade tekniken visat sig mycket framgångsrik för att avgöra frågan om godkännande - underkännande. Genom att använda tekniken kan antalet provtagningar reduceras med bibehållande av en rimlig tillförlitlighet, vilket sparar pengar. Tekniken är användbar inte bara för vägar utan vid olika typer av projekt där den undersökta ytan är av storleksordningen $10 \times 60 \text{ m}^2$. Minsta antal observationer i ett stickprov bör vara minst 6.

De statistiska metoder som redovisats ovan är ämnade att användas för att besvara frågan om godkännande kontra underkännande av en produkt. De är däremot inte lämpade som hjälpmedel för att avgöra vilken av två eller flera produkter som är "bäst". I dessa fall är det en metod som kallas "Variansanalys" som vanligtvis användes. I kap 5 "Försökslokal Oxie" har denna teknik använts för att analysera försöksdata från de mycket omfattande fältundersökningarna. En kort presentation av metoden görs därför.

En mer ingående kännedom kan erhållas ur Blom (1970) eller Huitfeldt (1972).

Vid en jämförande undersökning av vad slag det vara må försvåras alltid jämförelserna av att försöksvärdena är behäftade med "fel". Detta ger sig till känna som en variation i resultaten, dvs olika värden erhålles för mätningar utförda under samma betingelser. Denna variation kan kvantifieras och som ett mått på resultatens spridning brukar variansen användas. Denna är definierad såsom

$$s^2 = 1/(n-1) \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x}_m)^2 \quad (3.17)$$

där

x_j =värdet av den j:te observationen av x

$\bar{x}_m$ =medelvärde av alla de n observationerna av x

n =antalet observationer av variabeln x

Av uttrycket för variansen framgår att denna minskar med ökat antal observationer, så att en ökning av antalet observationer från ex vis 3 till 5 halverar variansen om man bortser från den ökning av kvadratsumman $\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x}_m)^2$ som samtidigt erhålles. Variansen i ett resultat kan ha sitt ursprung från i huvudsak två faktorer. Den ena, och många gånger den enda, av intresse

är den spridning som uppstår av att försökspopulationen inte är i alla avseenden homogen. Med detta avses att den mängd av vilken de gjorda observationerna är ett stickprov i något eller några avseenden ej är enhetlig. Denna olikhet, när den har någon betydelse för värdet på den studerade variabeln, ger på detta sätt upphov till en spridning i värdet av variabeln som icke kan förklaras. Då denna olikhet för det mesta är okänd för den som gör undersökningen är den samtidigt omöjlig att påverka, varför man brukar benämna spridningen för slumpmässig. Den andra orsaken till önskad spridning i försöksdata har sitt upphov i den onoggrannhet som är kopplad till använd observationsmetod. Dessa två källor till spridning är i normalfallet superponerade och kan ej särskiljas. Det är självklart så att en sådan spridning försvårar jämförande undersökningar, där syftet är att studera effekten på en viss variabel av en variation i en eller flera andra (styrande) variabler. Om den önskade spridningen är alltför stor kan de existerande skillnaderna mellan olika populationer dränkas och göra en jämförelse omöjlig. Det är därför av vikt att försöka begränsa denna spridning vid jämförande undersökningar. Det statistiska hjälpmedel som finns för att möjliggöra en meningsfull analys av effekten av olika behandlingar på en viss storhet infördes omkring 1920 av R A Fisher i samband med jordbruksförsök.

För att underlätta förståelsen av presentationen av metoden som följer nedan är det nödvändigt att klarlägga några begrepp. Vid en jämförande undersökning önskar man studera effekten av att olika faktorer A, B, C,.. befinner sig på olika nivåer $A_1, A_2, A_3, \dots, A_k$. En behandling eller en faktorkombination kan ex vis vara $A_2-B_1-C_5, \dots$. Man kan även göra en indelning efter klasser. En klass utgörs då av alla observationer när en faktor befinner sig på en bestämd nivå, oavsett vilken nivå alla övriga faktorer samtidigt befinner sig på. Så utgör ex vis alla observationer där faktorn A befinner sig på nivån 2 en klass.

Om man bildar ett medelvärde för alla de observationer av en variabel som gjorts i en jämförande undersökning så får detta medelvärde en avsevärd spridning kopplad till sig, dvs ett högt värde på variansen. Enligt variansanalysen kan dock en del av denna varians förklaras av de olika behandlingarna. Om man kallar den i uttrycket för variansen ingående kvadratsumman för Q så kan denna delas upp på flera delkvadratsummor så att

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C + \dots + Q_0 \quad (3.18)$$

Hur många delkvadratsummor som Q kan delas upp i avgörs av hur många faktorer som ingår i undersökningen. Delkvadratsumman Q_A talar alltså om hur mycket medelvärdena för de olika nivåerna inom faktor A skiljer sig åt, dvs

$$Q_A = \sum_i n_i (x_{i.} - x_{..})^2 \quad (3.19)$$

Den sista termen Q_0 kallas för residualkvadratsumma och utgör ett mått på hur mycket värdena inom varje stickprov skiljer sig åt sinsemellan, dvs den spridning som ej kan förklaras av de olika behandlingarna. För att kunna utnyttja variansanalysen som ett hjälpmedel krävs att en hypotes uppställs. Denna hypotes är nästan alltid densamma, nämligen att ingen skillnad finns mellan de olika behandlingarna eller, annorlunda uttryckt, att medelvärdena för de olika klasserna som kan bildas inom en faktor är lika, dvs

$$\begin{aligned} H_A : \mu_{a1} &= \mu_{a2} = \mu_{a3} = \dots = \mu_{ap} \\ H_B : \mu_{b1} &= \mu_{b2} = \mu_{b3} = \dots = \mu_{bq} \\ H_C : \mu_{c1} &= \mu_{c2} = \mu_{c3} = \dots = \mu_{ct} \end{aligned}$$

Med kvadratsummorna kända kan de sk. medelkvadraterna beräknas enligt

$$s_a^2 = Q_A / (p-1) \quad (3.20a)$$

$$s_b^2 = Q_B / (q-1) \quad (3.20b)$$

$$s_c^2 = Q_C / (t-1) \quad (3.20c)$$

$$s_0^2 = Q_0 / ((p-1)*(q-1)*(t-1)) \quad (3.20d)$$

Om hypotesen H_A är sann så gäller att s_a^2 och s^2 båda är skattningar av slumpvariansen och de bör därför vara ungefär lika stora. Är däremot H_A falsk så är s_a^2 betydligt större än s^2 . Genom att bilda kvoten s_a^2 / s^2 så erhålles en sk testkvantitet om vilken man vet att om H_A är sann så är s_a^2 / s^2 F-fördelad. Det är alltså möjligt att genom att jämföra testkvantiteten med F-fördelningens värde för $f_1=p-1$ och $f_2=(p-1)*(q-1)*(t-1)$ avgöra hurvida hypotesen med en viss statistisk säkerhet kan förkastas eller ej. Den statistiska säkerheten uttrycks mha av faktorn alfa som är ett tal mellan 0 och 1. Om testkvantiteten är större än F-fördelningens värde för ex vis alfa=.05 så innebär det att hypotesen att alla m är lika kan förkastas. Värdet på alfa uttrycker den risk med vilken man förkastar hypotesen trots att den är sann, dvs risken att förkasta hypotesen felaktigt är 5%. Genom att välja ett allt lägre värde på alfa så uppstår slutligen det läge där testkvantiteten ej längre är större än F-fördelningens värde för aktuellt alfa och således kan hypotesen ej förkastas för detta alfa. Beroende på det lägsta värde på alfa vid vilket hypotesen kan förkastas talas om avvikelens signifikansnivå.

Följande praxis har utbildats.

Om hypotesen kan förkastas för

alfa=0.05 så är avvikelsen * signifikant

alfa=0.01 så är avvikelsen ** signifikant

alfa=0.001 så är avvikelsen *** signifikant

Vid flerfaktorförsök förutsätts ofta att additivitet föreligger. Med detta avses att effekten av att en faktor (ex vis. A) befinner sig på en bestämd nivå är oberoende av vilken eller vilka nivåer övriga ingående faktorer samtidigt intagit. Detta kan matematiskt formuleras så att

$$m_{ijk} = a_i + b_j + c_k \quad (3.21)$$

Denna matematiska likhet skall tolkas så att medelvärdet m_{ijk} kan uttryckas som en summaeffekt av att faktorn A befinner sig på nivån i, faktorn B på nivån j och faktorn C på nivån k. Om denna likhet är omöjlig att uppställa säges egenskaperna vara icke additiva. Ett annat sätt att uttrycka samma sak är att säga att ett samspel råder mellan två eller fler faktorer, dvs effekten av att en faktor befinner sig på en viss nivå är beroende av vilken nivå någon eller några andra faktorer samtidigt befinner sig på.

3.7 Utförande och erfarenheter i Sverige

Frågor rörande tekniken att packa jord har i Sverige företrädesvis studerats av Forssblad. Forssblad & Broms (1968) presenterade en klassificering av jord med hänsyn till deras packbarhet med olika packningsredskap. Denna modifierades av Hansbo 1971 och fick då det utseende som återges i tabell 3.8.

Tabell 3.8 Klassificering av jord med hänsyn till deras packbarhet med olika packningsredskap, (efter Hansbo).

Packningsredskap	I. Spräng- stens- fyllning	II. Sand och grus		III. Silt, siltiga och le- riga jordar, morän		IV. Lera	
		A. välgra- derad	B. ensgra- derad 3)	A. Siltig sand siltigt grus morän	B. Silt, sandig silt, sand lerigt grus	A. Låg till medelhög sk skjuv- hållfast- het	B. Hög skjuv- håll- fasthet
Statisk slätvält, 3-15 t	-	x	x	x	x	x	-
Vibrationsvält, 3-5 t	x ²⁾	⊗	⊗	x	x	x	-
Vibrationsvält, 10-15 t	⊗ ²⁾	⊗	⊗	⊗	x	-	x
Vibratorplatta, 0.1-0.5 t	-	⊗	⊗	x	x	-	-
Vibratorstamp, 0.5-0.1 t	-	x	x	x	x	x	x
Gummihjulsvält, 10-50 t	-	x	x	⊗	⊗	⊗	-
Färfotsvält ¹⁾ , 5-30 t	-	-	-	-	x	x	⊗
Padfotsvält ¹⁾ , 5-30 t	-	x	x	⊗	⊗	⊗	x
Gallervält ¹⁾ , 5-15 t	x	x	x	x	x	x	-
Bandtraktor, 10-30 t	x	x	x	x ⁴⁾	x ⁴⁾	x ⁴⁾	-

1) Statiska eller vibrerande

2) Traktordragna

3) Självgående vältrar har ofta tillräcklig framkomlighet på ensgraderad sand och grus

4) Packas vid högre vattenhalt än optimal enligt Proctorpackning

Beteckningar: x kan ofta användas

⊗ rekommenderas

Mark AMA som i Sverige användes för att underlätta arbetet med arbetsbeskrivningar i samband med markarbeten, delar in fyllningsmaterial enligt tabell 3.9. För vart och ett av fyllningsmaterialen (utom grupperna 4, 5 och 6) anges i tabell 3.10 riktvärden för största lagertjocklek vid användandet av olika packningsredskap.

Tabell 3.9 Indelning av jordmaterial för fyllningsändamål, enligt Mark AMA C/1.

Grupp	Materialtyper	Fordringar			Exempel
		Halt (%)			
		0,06/20	0,002/20	Organ mate- rial	
1	Bergmaterial av hårda och hållfasta bergarter	0-10	0-5	0	Sprängsten av granit och glimmerfattig gnejs
2	Stenmoräner	0-10	0-5	0	Sandig, grusig stenmorän
	Grovkorniga moräner				Sandig grusmorän
	Grovjord				Grus, sand, singel
	Krossmaterial				Makadam
3a	Blandkorniga moräner	-	-	0	Siltig morän
3b	Finkorniga moräner	-	-	0	Sandig siltmorän
	Finjord				Silt, lera
4	Lätta material	-	-	0	Lättklinker, slagg

Fyllning med finkornig jord, för grundläggning av hus, vilket motsvarar materialgrupp 3 i tabell 3.9, anger RA 83 Mark (AMA) följande

"Fyllning och packning med finkornig jord kan föreskrivas, om det genom särskild utredning visas att erforderligt packningsresultat kan uppnås. Fyllning och packning bör i så fall föreskrivas bli utförd enligt klass 1, tabell C/4." (tabell 3.9).

"Ange

-särskilda åtgärder, t ex växelvis fyllning med grövre dränerande material, som kan bli aktuella vid regnig väderlek eller andra för packningen försvårande om-

ständigheter.

- krav på fyllningsmaterialiets vattenkvot, som bestäms i varje särskilt fall.
- erforderligt packningsresultat
- omfattning av materialkontroll
- omfattning av resultatkontroll"

Tabell 3.10 Största lagertjocklek och minsta antal överfarter per lager vid packning, enligt Mark AMA 83 C/5.

Packningsredskap	Minsta antal överfarter	Material enligt tabell C/1 och C/2, största lagertjocklek (m) efter packning			
		1	2	3a	3b
		Fa,Ga	A, B	C, D2	D1
Handstamp, min 15 kg	3	-	0,15	0,10	0,10
Vibratorstamp, min 70 kg	3	-	0,30	0,25	0,20
Vibratorplatta,					
min 50 kg	4	-	0,10	-	-
min 100 kg	4	-	0,15	0,10	-
min 200 kg	4		0,20	0,15	0,10
min 400 kg	4	0,40	0,30	0,25	0,15
min 600 kg	4	0,60	0,40	0,30	0,20
Vibrerande envalsvält,					
statisk linjelast, ¹					
min 15 kN/m	6	-	0,35	0,25	0,20
min 30 kN/m	6	1,0	0,60	0,50	0,30
min 45 kN/m	6	1,5	1,0	0,75	0,40
min 65 kN/m	6	2,0	1,5	1,10	0,60
Vibrerande tandemvält,					
statisk linjelast, ²					
min 5 kN/m	6	-	0,15	0,10	-
min 10 kN/m	6	-	0,25	0,20	0,15
min 20 kN/m	6	-	0,35	0,30	0,20
min 30 kN/m	6	-	0,50	0,40	0,30
Statisk trevalsvält,					
statisk linjelast,					
min 50 kN/m	6	-	0,25	0,20	0,20
Gummihjulsvält, last/hjul					
min 15 kN	6	-	0,20	0,20	0,20
min 25 kN	6	-	0,30	0,25	0,25
Bandtraktor, min 10 ton	6	-	0,25	0,20	0,20

¹ Vibrerande envalsvält med padfottrumma kan användas på fyllningsmaterial med hög finjordshalt, t ex silt.

² När packning utförs med vibrering på båda valsarna kan antalet överfarter minskas till fyra.

Forssblad (1981) skriver beträffande packning av lerjordar
 "To obtain the specified density, the water content should not diverge too much from the optimum water content and the main problem in clay compaction is very often to adjust the water content to the optimum."

Beträffande valet av packningsredskap skriver Forssblad (1981) "The possibilities to compact clay soils with vibratory compactors become more and more evident. In spite of this, there still is a wide spread belief that vibratory compaction is only suitable for compaction of non-cohesive soils."

Forssblad menar således att vibrerande vältar går utmärkt att använda för att packa lerjordar. Han gör emellertid förbehållet att de måste ha en relativt hög statisk vikt. Deras effektivitet kan ökas ytterligare genom att använda välttrummor försedda med "får-" eller "padfötter".

Stål (1972) redogör för omfattningen av det första större projektet i Sverige vid vilket lermorän utnyttjats som fyllningsmaterial. Anläggandet³ av Sturups flygplats utanför Malmö innebar att 2 milj m³ finkornig jord omfördelades inom området. Fyllningen lades ut i 0.3-0.5 m tjocka skikt vilka packades med fårfotsvält. För att påskynda eventuella sättningars utbildande lades 0.2 m tjocka sandskikt in på varannan meter i fyllningen. Fyllningsmäktigheten varierade inom området, men lokalt var fyllningen upp till 10 m mäktig. Artikeln innehåller tyvärr inga uppgifter om packningsföreskrifter och kontroll men genom pers. com. (Hartlen 1980) har följande uppgifter erhållits. Inledningsvis krävdes att packningsgraden skulle vara minst 90 % relaterad till tung laboratoriestampning, samt att massor med högre lerhalt än 5 % ej fick användas. Detta ändrades under arbetenas gång till 85 % tung lab stampning och högst 13 % lerhalt. Resultaten från packningsgradbestämningarna uppvisar mycket stor spridning i såväl vattenkvot som torrdensitet, fig 3.19.

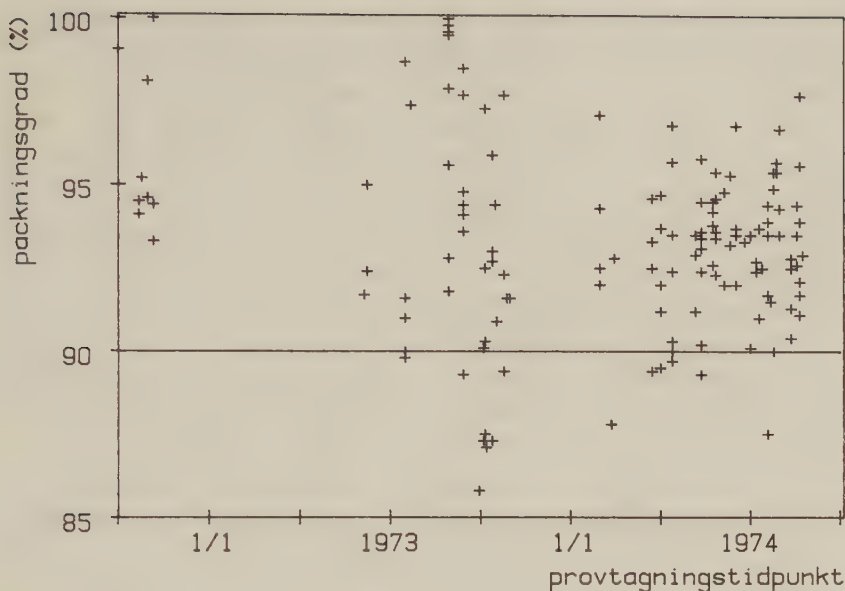


FIG 3.19 Resultat av packningsgradsbestämningar med vattenvolymeter vid byggandet av Sturups flygplats, (efter Hartle'n).

Lindskog (1972) redogör för sina erfarenheter som entreprenör vid 3 större fyllningsarbeten i Skåne; Barsebäck, Trelleborg och Lund. Fyllningsmassorna utgjordes vid samtliga lokaler av lermoräner med varierande lerhalt.

Lindskog pekar bl a på den stora variationen i massor som förekom inom en och samma lokal och visar detta med kornfördelnings- och packningskurvor. Packningskurvorna visar att den maximala torrdensiteten inom Lundalokalen varierade mellan 1.9 och 2.1 t/m³, fig 3.20 och 3.21.

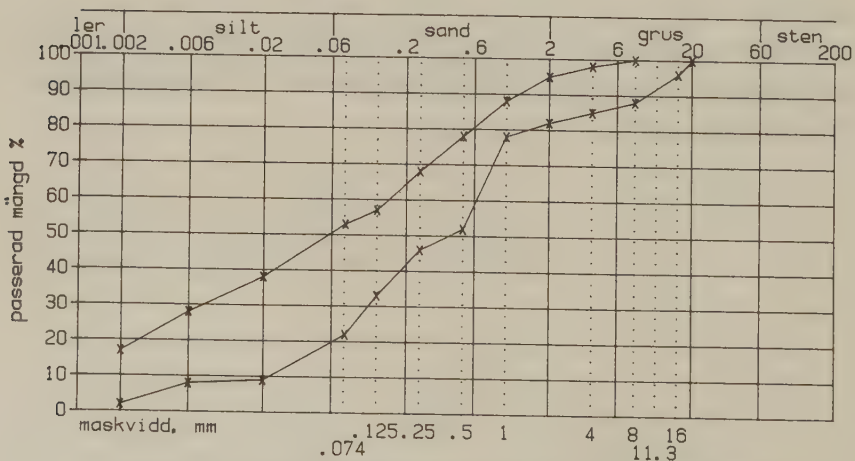
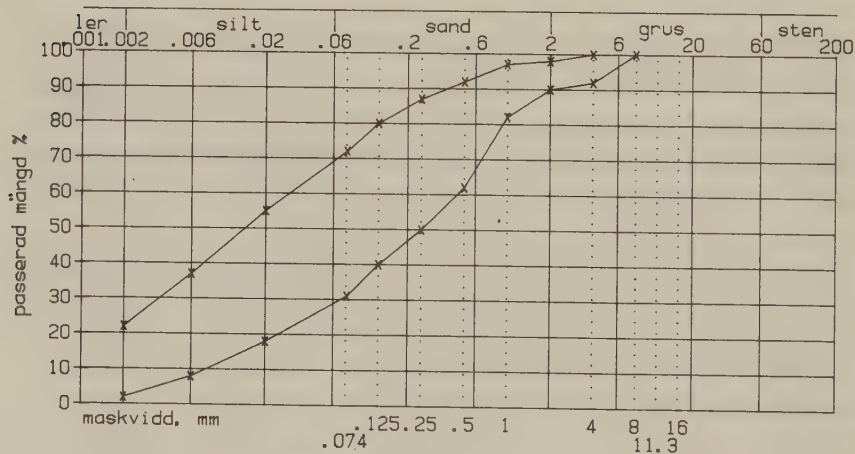
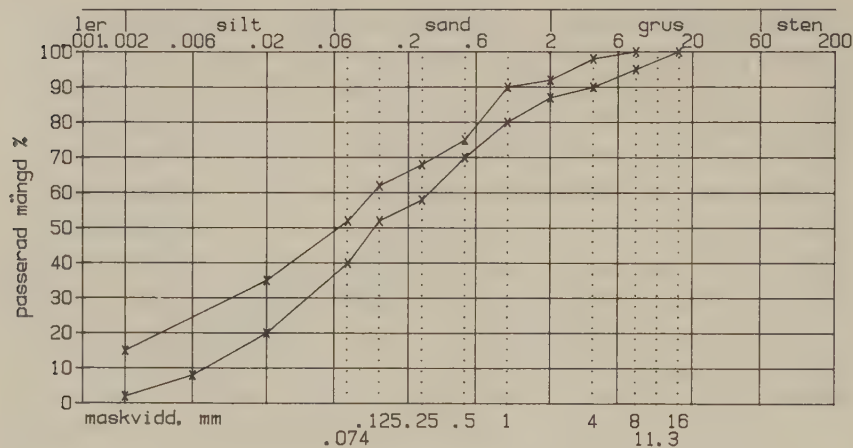


FIG 3.20 Kornfördelningskurvor vid tre lokalerna
a, Barsebäck b, Lund c, Trelleborg
(efter Lindskog)

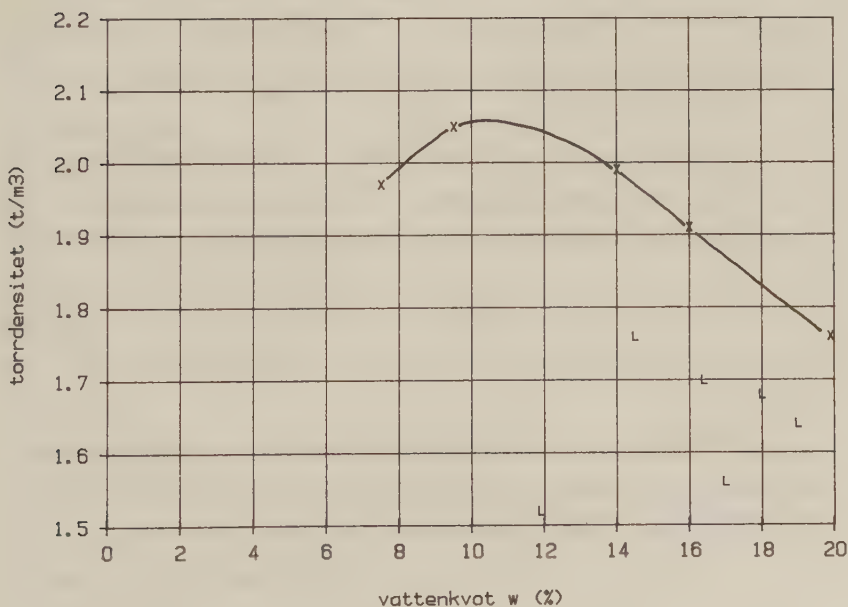
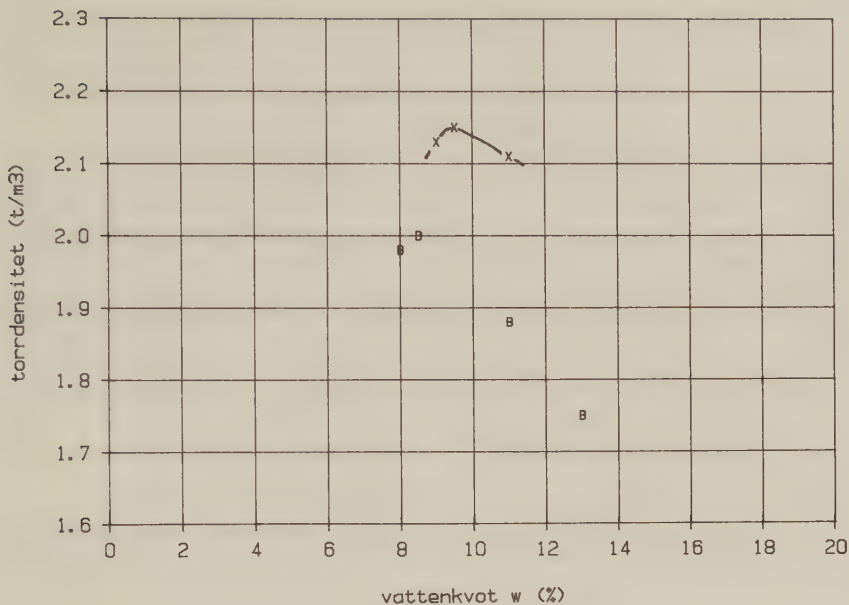


FIG 3.21 Packningskurvor (tung lab stampning) vid
 a, Barsebäck b, Lund c, Trelleborg
 Den naturliga jordens tillstånd är markerad
 med B, L och T, (efter Lindskog).

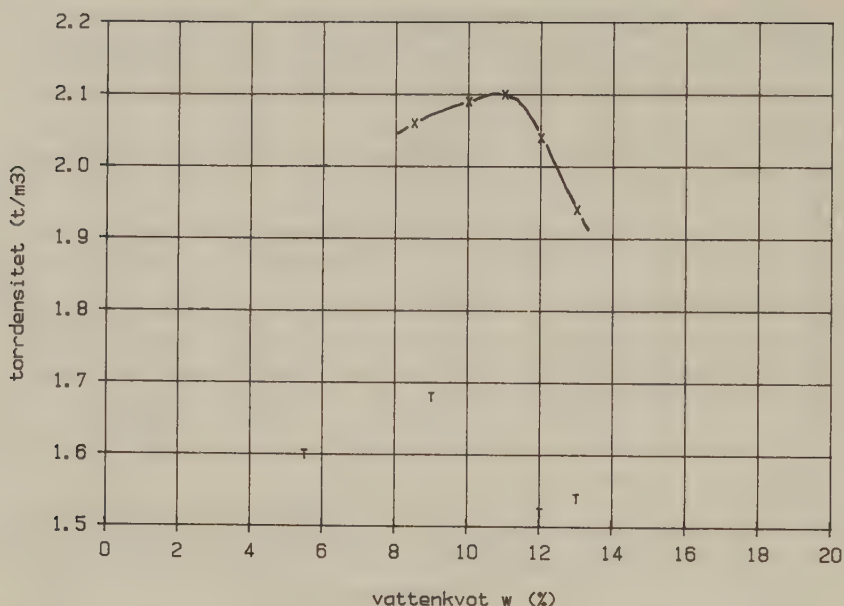


FIG 3.21 c

Vid samtliga lokaler har packningen utförts mha en halvfylld schaktvagn och antalet överfarter anpassats efter resultatet av packningsgradkontrollen. För att erhålla en god yta har ytan packats med en 3-tons vibrerande vält.

Vid Barsebäcks-lokalen uppnåddes 90 % packningsgrad tung lab stampning utan några svårigheter vilket Lindskog tillskriver det faktum att massorna togs på stort djup och var tämligen torra.

Vid Trelleborgslokalen användes ytlig lermorän med måttlig vattenkvot. Arbetena blev besvärliga först i samband med nederbörd.

Vid Lundalokalen blev svårigheterna stora trots gynnsam väderlek. Trots stor nedlagd möda blev resultatet inte tillfredsställande, vilket framgår av fig 3.22.

de av olika stort innehåll CaCO_3 , tabell 3.11.

Tabell 3.11 Tekniska egenskaper hos lermorän rik på respektive fattig på CaCO_3 , (efter Ahrentzen).

	CaCO_3 %	l_c %	w_L %	w_p %	I_p	w_{nat} %	w_{opt} %	$\rho_{d,max}$ t/m ³	c_v kPa	e_{nat}	E MPa
Lermorän kalkfattig	-	20	33	13	20	19	13	1,90	50	0,5	20
Lermorän kalkrik	20	20	22	12	10	12	10	2,00	300	0,3	50

De översta metrarna i en lermorän har ofta förlorat sitt innehåll av CaCO_3 genom urlakning pga nederbörd. Enligt Ahrentzen varierar den naturliga vattenkvoten i den CaCO_3 -fattiga lermoränen mycket över året, medan den CaCO_3 -rika lermoränen inte uppvisar några sådana variationer, fig 3.23.

Kännedomen om detta förhållande i kombination med de i tabell 3.11 återgivna skillnaderna i optimal vattenkvot, flytgräns och hållfasthet kan eventuellt förklara de svårigheter som ibland förekommit i samband med användandet av lermoräner som fyllningsmassor.

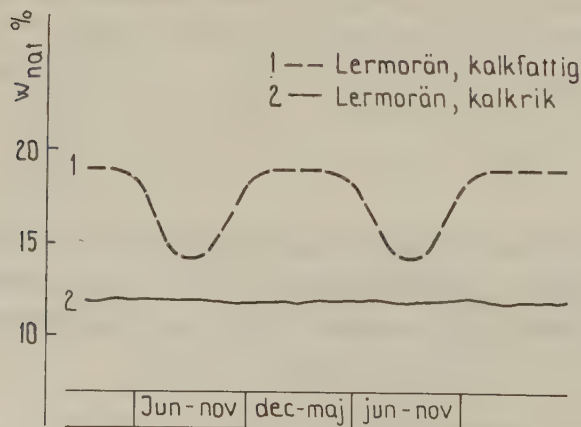


FIG 3.23 Den naturliga vattenkvotens variation över året i en CaCO_3 -fattig lermorän. (efter Ahrentzen)

4 Egna undersökningar - Lokalbeskrivningar

De egna undersökningarna omfattar försöksserier utförda vid tre olika lokaler. Av lokalerna är två belägna inom Malmö och en inom Lunds kommun. De två lokalerna i Malmö heter Dubbelknappen och Oxie.

Dubbelknappen är belägen inom Fosie industriområde i Malmö's sydöstra utkanter. Malmö kommuns fastighetskontor har där, under ett flertal år, iordningställt mark för industri-etableringar. Iordningställandet har till mycket stor del inneburit att fyllningar med silt- och lermoräner kommit till utförande, i avsikt att erhålla plana ytor lämpliga för industritomter. Detta har inneburit att förutom terrassering, har områden med icke bärkraftigt material grävts ur.

Den andra av de två lokalerna inom Malmö kommun är belägen i samma väderstreck som Dubbelknappen, men ytterligare något närmare Ystad. I anslutning till Oxie kyrkby har moderna villaområden vuxit upp under 1970-talet. Då den naturliga landskapsbilden inrymmer mycket kullar och dödishålor har en ommodellering av landskapet varit påkallad. Detta innebär att omfattande fyllningsarbeten genomförts. I huvudsak har till dessa arbeten utnyttjats de på platsen förekommande jordarterna, vilket innebär i huvudsak silt- och lermorän.

Den tredje lokalen, Gunnesbo, är belägen inom Lund kommuns nordvästra utkanter. Fyllningsarbetena föranleddes av att Alfa Laval behövde en industritomt för sina verkstäder. Området massbalanserades vilket medförde omfattande fyllningsarbeten med lermorän.

För jordmaterialen från samtliga tre lokaler har vissa klassificerande undersökningar genomförts. De storheter som bestämts är

kornfördelning

packningskurva (tung lab stampning)

kompaktdensitet

flytgräns (såväl stöt- som konflytgräns)

plasticitetsgräns

Ur kornkurvan har ler- och finjordshalt bestämts, fig 4.1a, b och c. Ur packningskurvan har optimal vattenkvot och maximal torrdensitet utvärderats, fig 4.2a, b och c. Resultaten från dessa bestämningar är för de tre lokalerna sammanställda i tabell 4.1.

Tabell 4.1 Sammanställning av klassificerande undersökningar på material från försökslokalerna Dubbelknappen, Oxie och Gunnesbo.

	Dubbelknappen	Oxie	Gunnesbo
finjordshalt % *	40 - 45	32 - 45	50
lerhalt % *	10 - 12	9 - 13	20
kompaktdensitet t/m ³	2.71	2.66	2.67
optimal vattenkvot % +	7.7	8.1	8.3
maximal torrdensitet t/m ³ +	2.12	2.16	2.09
stötflytgräns %	22.8	20.2	30.9
konflytgräns %	22.4	21.2	28.6
plasticitetsgräns %	11.3	14.2	10.2

* på material < 20 mm

+ enligt tung laboratoriestampning

Enligt 1981 års jordartsindelning (SGF: s lab kom) benämnes moränerna vid tre lokalerna

Dubbelknappen: sandig siltig lermorän

Oxie: lerig sandig morän - sandig siltig lermorän

Gunnesbo: sandig siltig lermorän

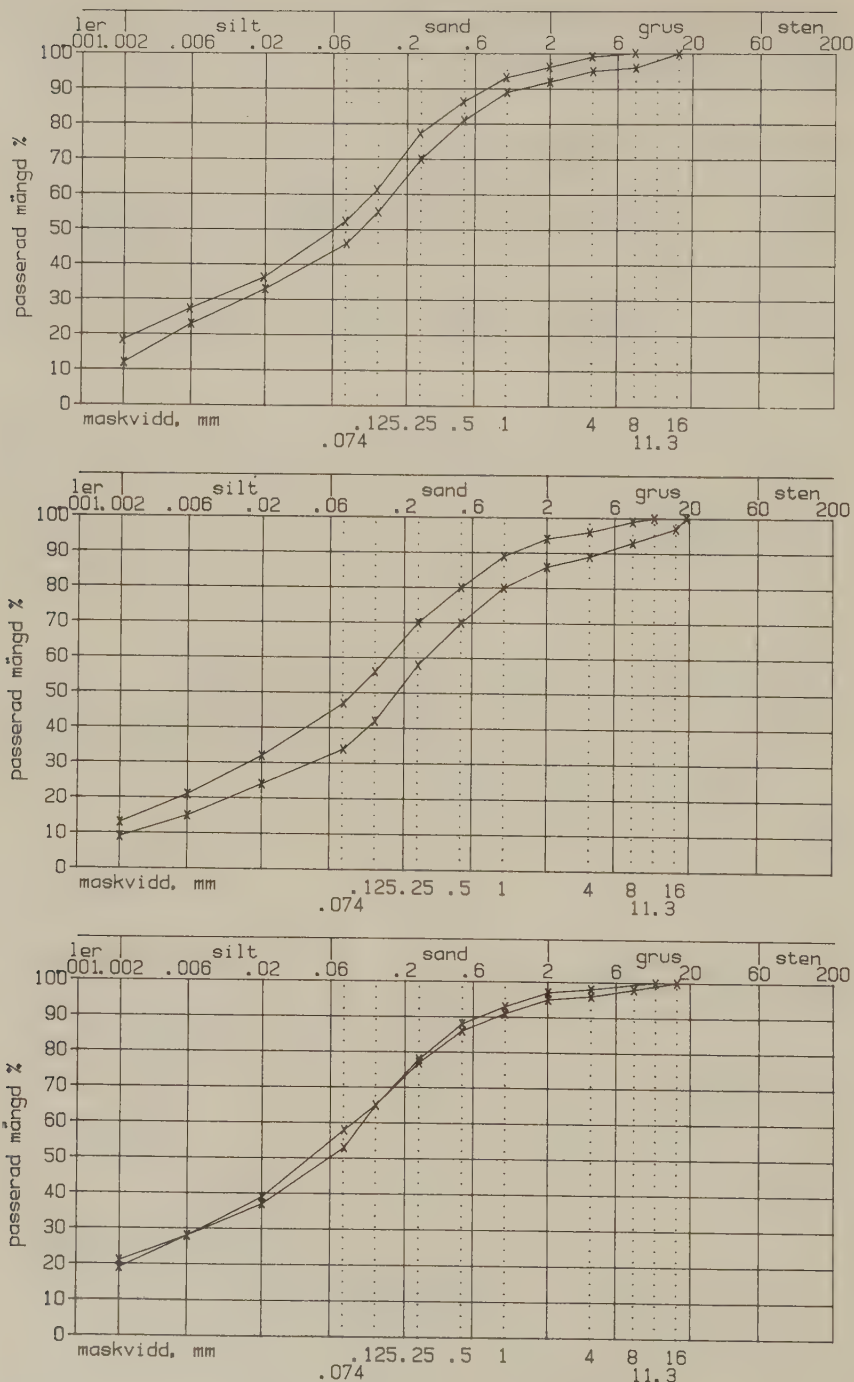


FIG 4.1 Kornfördelningskurvor för lokal

- a / Dubbelknappen
- b / Oxie
- c / Gunnesbo

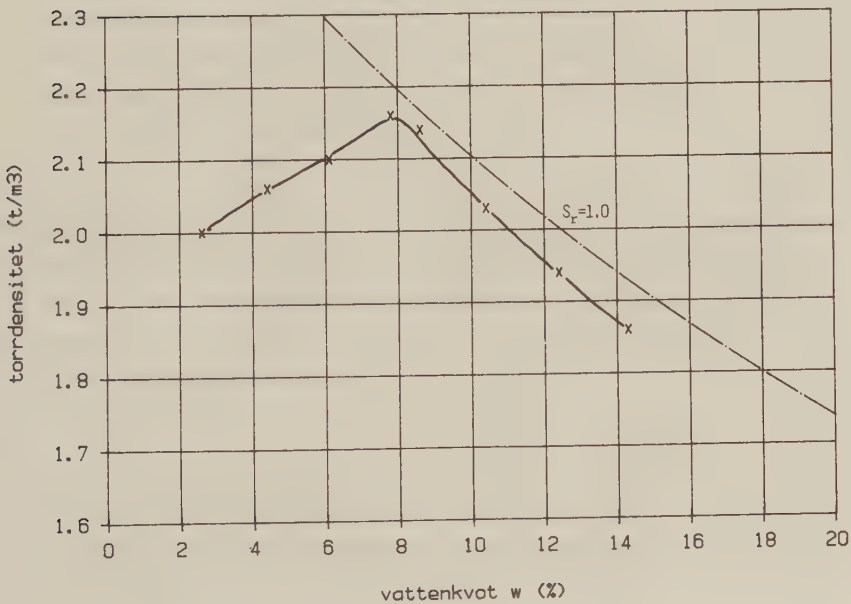
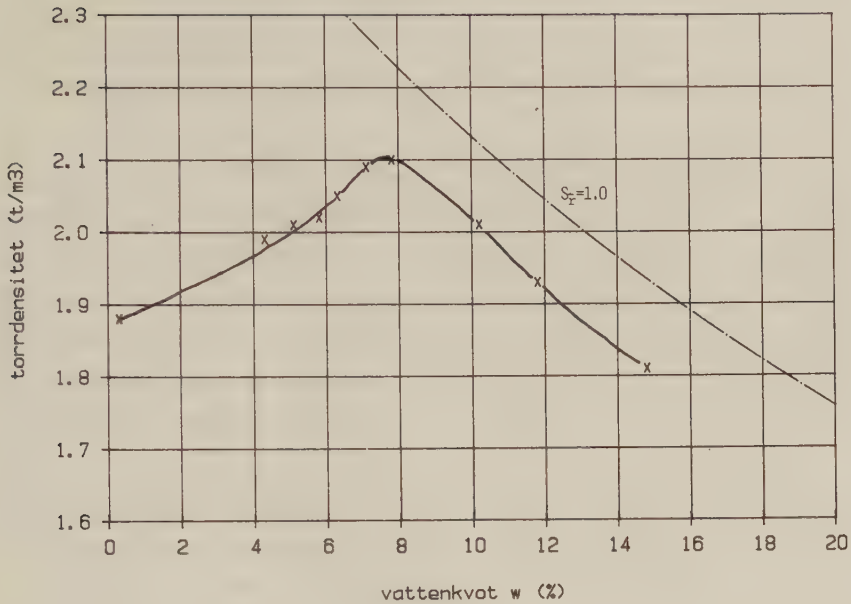


FIG 4.2 Packningskurvor för lokal

a / Dubbelknappen

b / Oxie

c / Gunnesbo

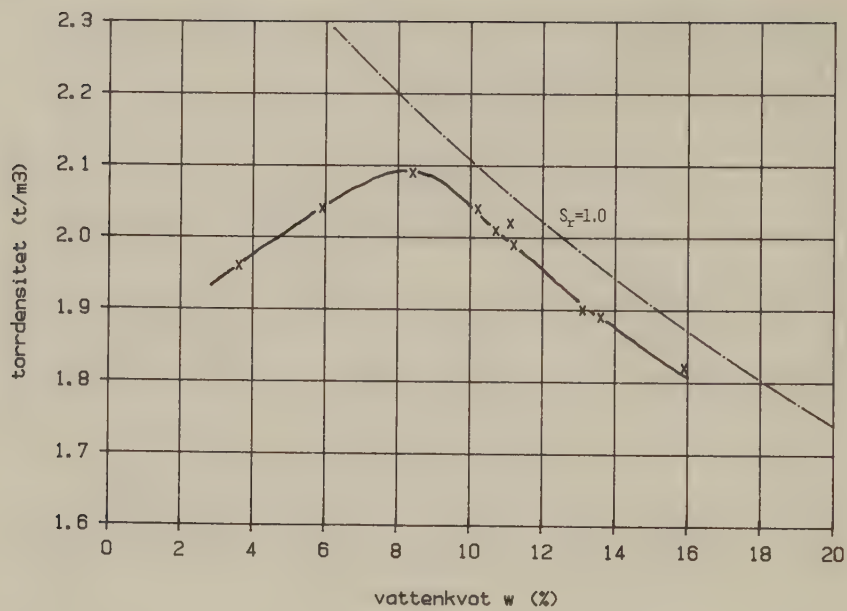


FIG 4.2 c

5 Försökslokal Oxievång

5.1 Försöksutförande

5.1.1 Allmänt

Vid denna försökslokal var syftet att söka klargöra olika sonderings- och belastningsmetoders lämplighet för bestämning av egenskaperna hos en skiktvis uppbyggd finkornig fyllning. De metoder som medtogs i undersökningen ansågs antingen ha goda förutsättningar att vara lämpliga eller har traditionellt ägt en stark förankring inom praktisk geoteknik. Detta innebär att följande metoder ingick

- compactometer, indirekt metod
- densitetsbestämning med vattenvolymeter, indirekt metod
- fallviktsretardationsmätning, direkt metod
- pressometerförsök, direkt metod
- skjuvvågshastighetsbestämning, direkt metod
- trycksondering, direkt metod
- vattenkvotsbestämning, indirekt metod
- viktsondering, direkt metod
- vingsondering, direkt metod

Med direkt metod avses en metod som mäter en eller flera av de parametrar som ytterst är av betydelse för fyllningens uppförande, ex vis hållfasthet eller kompressibilitet. Med de indirekta metoderna mäts istället en eller flera parametrar som är korrelerade med de sökta storheterna.

Förutom ovan upptagna metoder så utfördes även statiska plattbelastningsförsök. Avsikten med dessa försök var att de skulle tjäna som referens vid analysen av resultaten från övriga försök. De flesta av de i undersökningen ingående försökstyperna är välkända och torde därför inte tarva någon närmare presentation. Några försökstyper är dock så speciella eller ovanliga att en närmare beskrivning är befogad. Dessa är compactometern, fallviktsretardationsmätning och skjuvvågshastighetsbestämning. En beskrivning av dessa metoder följer nedan.

5.1.2 Compactometern

När ex vis ett fundament på ytan av ett elastiskt medium ut-sätts för en påtvingad svängning av bestämd frekvens så kommer fundamentet att svänga på ett sätt som är beroende av elasti-citetsmodulen hos det material på vilket fundamentet vilar. Vid låg modul hos underlaget erhålles en ren sinusformad svängning utan närvaro av övertoner. Vid ökande E-modul ökar också förekomsten av övertoner i svängningen. Denna fysi-kaliska princip har Geodynamik AB i samarbete med Dynapac AB utnyttjat vid framtagandet av compactometern. Compactometern består av två delar. Den ena delen utgöres av en acce-lerationssensor monterad på trumaxeln till en vibrerande vält. Den signal som alstras av accelerometern under vibropackning tas om hand i en liten låda, där viss bearbetning av signalen äger rum. Denna bearbetning innebär i stora drag att före-komsten av övertoner bestäms. Lådan är även försedd med en display där ett siffervärde kan avläsas. Det visade värdet är ett medelvärde över en tidsperiod av antingen fem eller trettio sekunder beroende av vilken integrationstid som valts. Det erhållna värdet är ej någon absolut storhet utan endast ett relativt mått på fastheten hos det material som välten samtidigt packar. Compactometerns stora fördel ligger i att en uppfattning om de packade jordlagrens fasthet erhålles i direkt anslutning till själva packningsarbetet. Rätt utnyttjad bör således metoden vara ett utmärkt hjälpmedel vid styrningen av packningsarbetet. Metoden bör dock alltid kompletteras med någon annan typ av packningskontroll då som tidigare nämnts compactometervärdet endast är ett relativt fasthetsmått.

Faktorer vilka kan leda till besvär vid tolkandet av cmv-värdet utgöres främst av

- vattenkvoten i en finkornig fyllning
- utseendet hos den zon som influerar cmv-värdet
- utrustningens avstämning mot vältyp och körhastighet av välsen.

5.1.3 Fallviktsretardationsmätning

För en kropp som är utsatt för ett kraftsystem som ej är i jämvikt gäller att den resulterande kraften på kroppen ger upphov till en acceleration/retardation av kroppen i resultantens riktning. Detta beskrives matematiskt med Newton's andra lag

$$F = m \cdot a \quad (5.1)$$

Om hos en kropp med känd massa (m) det är möjligt att mäta retardationen (eller accelerationen) som funktion av tiden så kan således den resulterande kraften (F) härur bestämmas. Accelerationen är lika med andraderivatan av förskjutningen map tiden, dvs

$$a = d^2 z / dt^2 \quad (5.2)$$

Om hastigheten (v_0) hos kroppen vid en tidpunkt (t_0) är känd så kan således kroppens rörelse under en tidsrymd från $t=t_0$ till $t=t_1$ bestämmas genom att integrera den uppmätta accelerationen två ggr map tiden inom det aktuella tidsintervallet. Hastigheten vid tidpunkten t_1 erhålles ur

$$v_1 = v_0 + \int_0^1 d^2 z / dt^2 dt \quad (5.3)$$

och förskjutningen

$$z = v_0 (t_1 - t_0) + \int_0^1 \left(\int_0^1 d^2 z / dt^2 dt \right) dt \quad (5.4)$$

Det är alltså på detta sätt möjligt att i varje tidsögonblick bestämma kroppens rörelse (eller förskjutning) samt den resulterande kraft varmed kroppen påverkas. Dessa fysikaliska samband utgör den teoretiska bakgrunden för fallviktsretardationsmätning.

Praktiskt utfördes försöken så att en cylinderformad massa av järn försågs med en accelerometer av piezoelektrisk typ. Accelerometern var monterad i botten på den i övrigt homogena cylindern, fig 5.1. Cylindern hölls sedan mha en elektromagnet vilken hängde i skopan på en hjullastare, på en bestämd höjd över fyllningens överyta. Genom att snabbt polvända strömmen till elektromagneten så erhölls ett väldefinierat släpp och cylindern föll mot marken. Retardationen då cylindern kom i kontakt med marken registrerades på ett oscilloskop. Oscilloskopets trignivå var inställd så att triggnig ägde rum ca 10 ms efter islaget. Då det använda oscilloskopet hade pre-trigging möjlighet kunde hela islagsförloppet registreras. Dessutom var oscilloskopet försett med en digital utgång varför registreringen kunde föras över på hållremsa vilket möjliggjorde en senare bearbetning av försöksdata i dator. Ett speciellt datorprogram utvecklades för detta ändamål, vilket för varje tidsögonblick räknade ut cylinderns retardation, hastighet och förskjutning. Ur retardationen bestämdes även den resulterande kraften på cylindern. Denna kraft, som var lika med den kraft varmed jorden påverkade cylindern kunde, då cylinderns bottenarea var känd, räknas om till ett kontaktryck mellan cylinder och jord. Härav blev det möjligt att rita upp en spännings-deformationskurva från varje försök. Därutöver beräknade programmet tangent- och sekantmodul för vart 100:e kPa grundtryck.

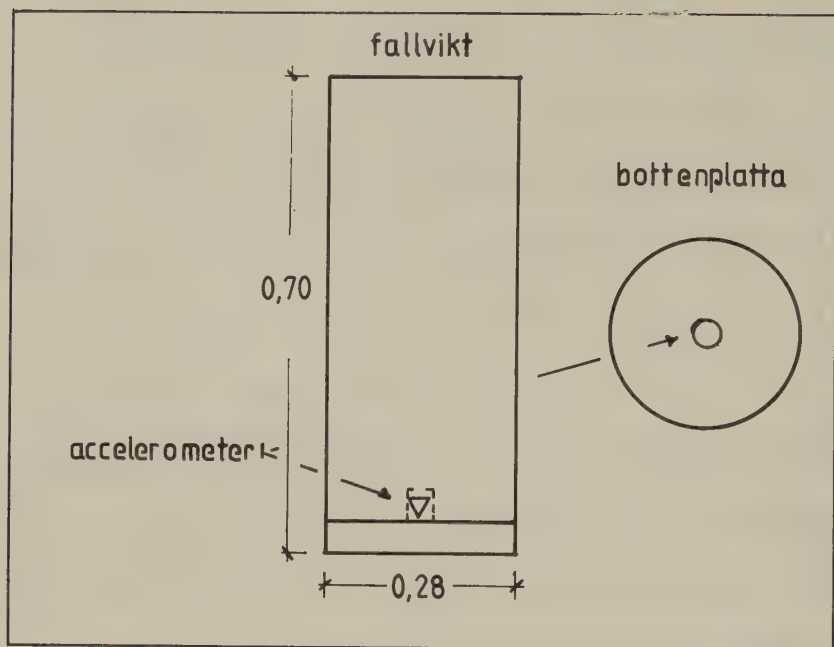


FIG 5.1 Fallvikt med accelerometer.

5.1.4 Skjuvvågshastighetsbestämning

Vid stöt mot ett halvoändligt elastiskt medium alstras i mediet vågrörelser av olika typ. De huvudsakliga vågtyperna utgöres av kompressionsvågen och skjuvvågen. Dessutom uppstår på ytan av mediet en sk Ralyeighvåg. Kompressionsvågen är den av vågorna som har den snabbaste utbredningshastigheten men samtidigt det minsta energiinnehållet. Vid en stöt vinkelrätt mot mediet fortplantas ca 7% av den tillförda energin med kompressionsvågen. Skjuvvågen svarar för ca 26 % och Ralyeighvågen svarar för återstoden, ca 67 %. Man kan visa att vågornas utbredningshastighet endast är en funktion av mediets densitet och elastiska egenskaper. Så kan ex vis kompressionsvågens hastighet vid utbredning i en stavformad kropp skrivas

$$v_c = \sqrt{E/\rho} \quad (5.5)$$

och skjuvvågshastigheten är samtidigt

$$v_s = \sqrt{G/\rho} \quad (5.6)$$

Vid vågutbredning i ett oändligt medium blir motsvarande hastigheter

$$v_c = \sqrt{M/\rho} \quad (5.7)$$

och

$$v_s = \sqrt{G/\rho} \quad (5.8)$$

Olika typer av seismiska undersökningsmetoder bygger på att ett vågpaket alstras i jorden mha ex vis sprängmedel. Gångtiden mellan två eller flera punkter på markytan för den på så sätt alstrade kompressionsvågen bestämmes mha geofoner och en seismograf. Genom upprepade mätningar kan på detta sätt erhållas en uppfattning om de olika jordlagrens mäktighet. Dessutom kan, med utgångspunkt från de uppmätta gånghastig-

heterna, en ungefärlig uppfattning om lagertyp erhållas. Önskar man däremot använda vågutbredningsteori för bestämning av de elastiska egenskaperna hos ex vis jord så bör istället för kompressionsvågshastigheten, skjuvvågshastigheten bestämmas. Skälen till detta är två. Som framgår av ekv (5. 5) och (5. 7) ovan så är kompressionsvågens hastighet olika i en stav och ett oändligt medium. Detta medför att om osäkerhet råder om randvillkoren för den undersökta jordvolymen så råder motsvarande osäkerhet om vilken elastisk parameter som erhålles såsom

$$\rho \cdot v_c^2 \quad (5.9)$$

Skjuvvågshastigheten är däremot oberoende av dessa randvillkor, varför motsvarande osäkerhet ej är aktuell. Dessutom är det så att kompressionsvågens hastighet starkt påverkas av om porerna i jordmassan är vattenfyllda eller ej. Vatten är i jämförelse med många jordmaterial inkompressibelt, varför den i vattenmättad jord uppmätta hastigheten ofta närmar sig kompressionsvågens utbredningshastighet i vatten. Till en vätskas signifikanta egenskaper hör dock att den saknar skjuvhållfasthet varför den saknar förmåga att fortplanta skjuvvågen. Detta innebär att skjuvvågshastigheten är oberoende av om jordmaterialets porer är vattenfyllda eller ej. Det är mot bakgrund av ovan helt naturligt att intresset inriktats mot bestämningar av skjuvvågshastigheten vid de tillämpningar där de elastiska egenskaperna sökts. Ett flertal metoder finns också utvecklade för detta ändamål. De viktigaste är cross-hole och down-hole metoderna. Dessa finns beskrivna på ett flertal ställen i litteraturen (ex: ASTM STP 654) varför en beskrivning av dessa här anses överflödiga. Båda dessa metoder innebär dock att ett eller flera borrhål utnyttjas vid mätningarna. Då avsikten med i detta arbete gjorda undersökningar var att klargöra huruvida skjuvvågshastighetsbestämningar var en lämplig metod för att skiktvis kontrollera en finkorningfyllning bedömdes ingen av dessa metoder som lämplig. Därför utnyttjades istället en mycket enkel teknik vilken innebar att

en skjuvvåg alstras genom att med en slägga slå lätt mot ena ändytan av ett på marken liggande betongprisma. Den på så sätt alstrade skjuvvågen registrerades mha två geofoner monterade på markytan med ett inbördes avstånd av en meter, se fig 5.2. De från geofonerna avgivna signalerna registrerades på ett två-kanals oscilloskop. Via oscilloskopets analoga utgång överfördes registreringen till en linje-skrivare. Då inställningarna på såväl oscilloskop som skrivare var kalibrerade kunde skillnaden i gångtid för skjuvvågen till de två geofonerna bestämmas. Att det verkligen var skjuvvågen som registrerades kunde enkelt kontrolleras genom att först slå på betongprismats ena ändyta därefter den andra. Registreringen av skjuvvågen kom på detta sätt att erhålla olika polarisation. Detta är en egenskap som övriga vågtyper ej uppvisar. Skjuvvågshastigheten bestämdes på detta sätt i totalt trettio punkter i varje skikt. I varje punkt bestämdes hastigheten i två mot varandra vinkelräta riktningar, parallellt med och vinkelrätt mot vältriktningen. Detta gjordes med avsikt att klargöra huruvida skjuvvågshastigheten var olika i dessa två riktningar.

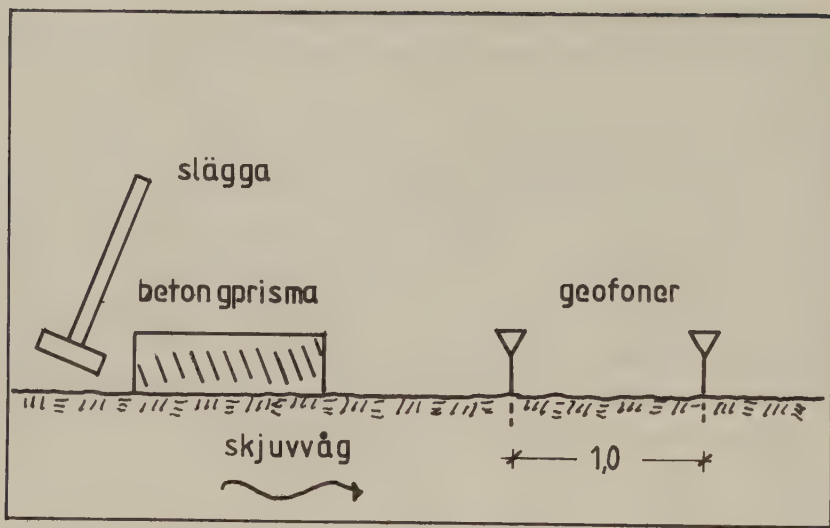


FIG 5.2 Utrustning för skjuvvågshastighetsbestämning.

5.1.5 Statiska plattbelastningsförsök

För att kunna relatera resultaten från utförda sonderingar och andra försökstyper, till bärighet och sättningar, utfördes 2 st plattbelastningsförsök på varje delyta. Dessa utfördes med cirkulära platsgjutna betongplattor med diametern $B=0.72$ m, vilket ger en area av 0.57 m^2 . Som mothåll användes en 4 m lång stålbalk vilken i sin tur var förankrad med i jord injekterade dragstag. Dragstagen var 12 m långa och injekterade utmed de nedre 9. Avsikten var att de skulle ha en brottlast av minst 250 kN per stag, dvs totalt minst 500 kN. Detta motsvarar för aktuell platta ett grundtryck av 885 kPa, vilket ansågs fullt tillräckligt.

Eftersom plattbelastningsförsöken ej kom till utförande förrän i september 1981, dvs en tjälningsprocess efter det att fyllningen färdigställts och huvudparten av övriga försök utförts, befanns det motiverat att schakta av det översta skiktet innan plattbelastningsförsöken utfördes. Genom detta förfarande bedömdes att större delen av effekten av tjälningen eliminerades.

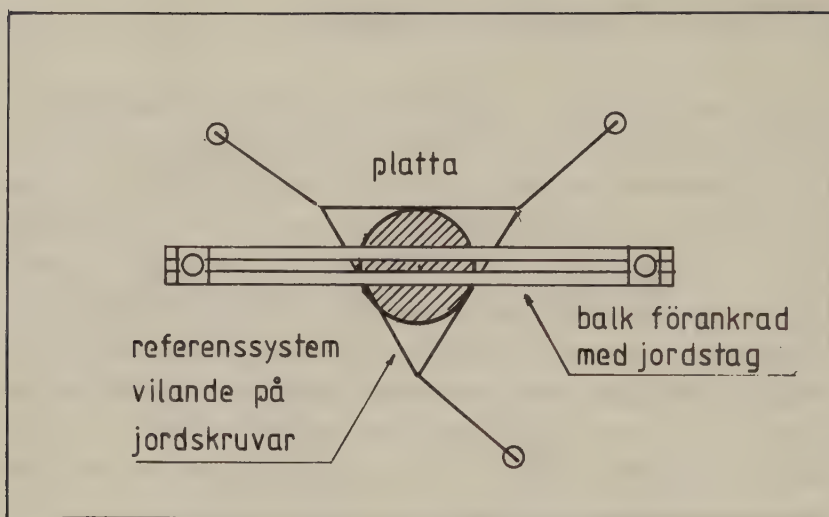


FIG 5.3 Plan över utrustning vid plattbelastning.

Kraften på plattan applicerades mha en hydraulisk domkraft med eldriven pump. Kraften registrerades av en kraftsensor av elektrisk typ. Plattans sättning mättes samtidigt med deformationssensorer i form av skjutpotentiometrar i tre punkter utmed plattans periferi, se fig 5.3. Som referenssystem för skjutpotentiometrarna användes en triangel med sidan 1.2 m tillverkad av 1" vattenledningsrör. Vid vart och ett av triangelns hörn var med bult fastsatt ett 1.5 m långt rör av samma kvalitet. Dessa tre rör var i sin tur fastsatta vid övre delen av varsin i jorden neddragen jordskruv. Referens-triangeln kom att på detta sätt vara inspänd i marken i tre punkter, var och en på ett ungefärligt avstånd av 2 m från plattcentrum. Detta avstånd var i knappaste laget med tanke på att influenszonen för en platta räknas som en cirkel med diametern 7 gånger plattbredden, vilket skulle motsvara en cirkel med diametern 5 m. Dock kunde inte avståndet väljas

större då hela försöksuppställningen skulle rymmas i ett tält med måtten 3 gånger 6 m². Därför hölls uppsikt över referenssystemets upplagspunkter i avsikt att upptäcka någon sprickbildning i deras närhet orsakade av hävning i jorden här rörande från plattan. Några visuellt registrerbara sprickor i upplagspunkternas närhet erhöles dock inte.

De uppmätta värdena på kraft och deformation lagrades automatiskt på kassettband mha en datalogg. Denna kunde ställas in för kontinuerlig eller tidsstyrd scanning. Vid kontinuerlig scanning erhöles en scanntäthet motsvarande 10-15 scann/min. De från de olika plattbelastningsförsöken erhållna kassettbanden lästes efter avslutat försök in i dator där värdena lagrades för senare utvärdering och analys.

För att underlätta jämförelser mellan de olika plattbelastningsförsöken var det viktigt att de var reproducerbara. Av den anledningen lades redan innan försöken startats fast en belastningsplan efter vilken samtliga försök skulle utföras. Denna innebar att plattorna belastades stegvis med belastningssteget 50 kPa upp till 500 kPa. Från 500 kPa och upp till "brott" var belastningssteget 100 kPa. Då avsikten var att ur försöken även utvärdera kryptrycket var det väsentligt att belastningsstegen ej varierades för mycket inom ett och samma försök såväl som mellan försöken. Varje laststeg fick verka i 32 min. Att tiden per laststeg valdes till just 32 min motiverades av att tidigare plattbelastningsförsök i denna typ av jord visat att krypningen stabiliserat sig inom denna tidsrymd, samtidigt som försöken med förväntat antal laststeg till "brott" då skulle kunna utföras på rimlig tid. Med uttrycket att krypningen "stabiliserat sig" avses att krypningen inom ett logaritmiskt tidsintervall är konstant eller avtagande.

5.1.6 Försöksuppläggning

Det volymsberoende som kan förutses hos hållfasthet och kompressibilitet i fyllningar av silt- och lermoräner ger inte sällan vid ordinära sonderingsmetoder upphov till en för utvärderingen besvärande spridning i resultaten. Det beslutades därför att fältarbetena vid Oxievång skulle utformas och ges sådan omfattning att en statistisk bearbetning av försöksdata blev möjlig. Den statistiska metod som valdes som hjälpmedel vid resultatanalysen benämnes variansanalys. En beskrivning av denna metod ges i kap 3. De variansanalysberäkningar som redovisas i 5.2 har utförts med rutiner ur "Scientific Subroutine Package" vilket är ett programpaket utgivet av Norsk Data A.S. För att den statistiska analysen skulle vara möjlig krävdes att speciell omsorg ägnades åt försöksuppläggningsen. Av den anledningen kopplades statistisk expertis in i samband med detta.

Tidigare laboratorieförsök hade visat att egenskaperna hos en färdig fyllning av ler- eller siltmorän är starkt beroende av vattenkvoten vid packningstillfället samt den packningsgrad som då uppnåtts. Det var därmed givet att dessa parametrar skulle varieras vid fältförsöken. I samråd med Lars Forssblad vid Dynapac AB bestämdes att tre olika grader av packningsarbete skulle undersökas, motsvarande 2, 4 respektive 8 överfarter med en tung vibrerande vält. Som lämplig vält valdes en Dynapac typ CH 47, vilket är en 6.1 ton vibrerande vält. Samtidigt beslutades att välten skulle vara försedd med sk compactometer. Vad gäller vattenkvoten hos fyllningsmaterialet insågs tidigt att en precis styrning av denna var praktiskt omöjlig. Det ansågs därför rimligt att endast definiera två möjliga nivåer för vattenkvoten i undersökningen. Den högre nivån innebar att materialet packades vid den vattenkvot som materialet hade naturligt. Den lägre nivån innebar att rimliga åtgärder skulle vidtagas för att sänka den naturliga vattenkvoten hos materialet innan det packades. Detta förfaringssätt innebar att vattenkvoten kom att variera även inom de två

fastställda nivåerna. För att en fullständig kombination av vattenkvot och packningsgrad skulle kunna undersökas krävdes att $2 \cdot 3 = 6$ provytor iordningställdes. Det var naturligt att lägga de sex ytorna i anslutning till varandra. För att den planerade undersökningsinsatsen skulle rymmas inom var och en av de sex ytorna krävdes en kvadratisk form med en sidlängd av 10.0 m. Dessa ytor placerades intill varandra i två rader om vardera tre ytor. Den totala försöksytan kom på detta sätt att omfatta en rektangel med måtten 20 gånger 30 m². De sex ytorna "numrerades" från A till F. För att minska risken för signifikant inflytande på försöksresultaten från icke kontrollerbara faktorer, vilket skulle kunna försvåra jämförelser mellan de sex ytorna, användes slumpstal vid fördelningen av vattenkvots och packningsarbetsnivåer mellan de sex ytorna. Resultatet av denna fördelning framgår av fig.5.4.

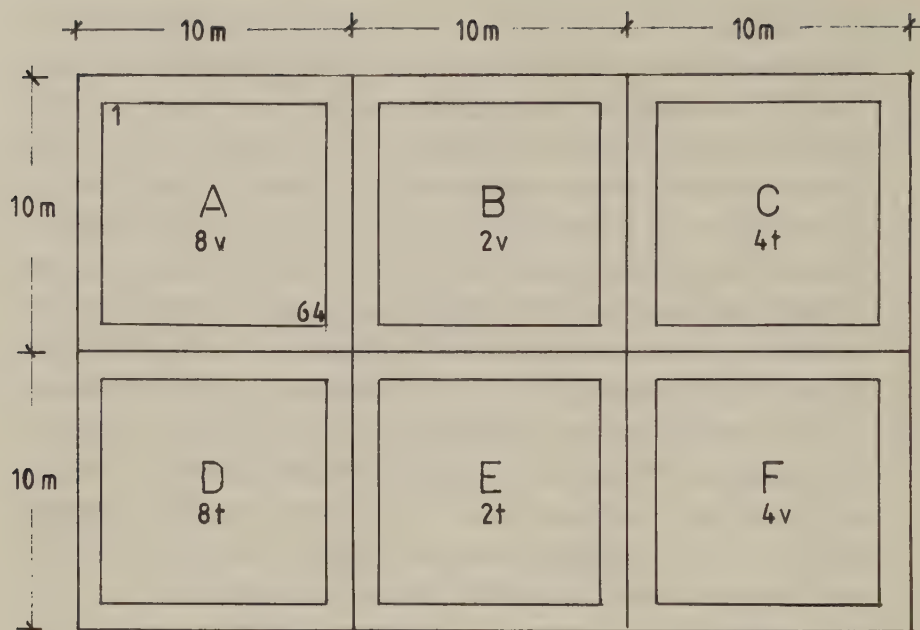


FIG 5.4 Plan över försöksfyllning i Oxie.
I respektive ruta är antal vältövers-
farter och "vattenkvot" angivna.

Då det undersökningsprogram som skulle genomföras var tämligen omfattande krävdes en ordentlig planering av var på de sex ytorna olika undersökningar skulle äga rum. Detta gjordes så att varje provyta imaginärt delades in i 64 st kvadrater med sidan 1.0 m^2 . Dessa 64 rutor omgavs av en 1.0 m bred korridor inom vilken inga undersökningar skulle äga rum. Syftet med denna korridor var att reducera randeffekterna. På varje delyta skulle följande undersökningar äga rum

- 5 densitets- och vattenkvotsbestämningar
- 5 fallviktsretardationsmätningar
- 5 pressometerprofiler
- 5 skjuvvågshastighetsbestämningar
- 5 spetstrycksonderingar
- 5 viktsonderingar
- 5 vingsonderingar
- 2 statiska plattförsök

Detta innebar att 37 av de 64 rutorna inom varje delyta skulle tas i anspråk. Vid fördelningen av de 37 försöken på de 64 rutorna användes återigen ett slumptalsförfarande. Detta gjordes individuellt för de sex ytorna. Icke utnyttjade rutor skulle senare kunna utnyttjas om behov förelåg. Därför skrevs de upp i en slumpmässig ordning så det var möjligt att plocka rutor ur denna serie och ändå få ett slumpmässigt urval. Dessa rutor kom till användning vid bl a pressometerförsöken då det visade sig nödvändigt att utnyttja två hål för att erhålla en profil med sådan täthet mellan bestämningarna som var önskvärd.

Avsikten med ovan angivet förfarande var att undvika inverkan på försöksresultat från störning i jorden orsakad av tidigare utfört försök. Rent praktiskt tillgick försöksplaceringen i planet så att skärningspunkten mellan diagonalerna i rutorna koordinatbestämdes i ett för hela provytan internt koordinat-system. Dessutom bestämdes sträckan från dessa skärningspunkter till 4 st befästningsrör vart och ett beläget 5.0 m (i vardera riktnig) utanför hela provytans 4 hörn. Med hjälp av dessa sträckor och två måttband kunde försökspunkterna skäras in.

5.1.7 Iordningställande av provytor

Arbetet med att iordningställa provytorna inleddes i början av juni månad 1980. En lämplig plats skulle uppfylla fyra villkor. Dessa var

1. Den naturliga jorden skulle vara homogen så att likartat underlag erhöles för hela provytan.
2. Platsen skulle ligga högt så att någon avrinning till försöksområdet ej ägde rum vid nederbörd.
3. Markytan skulle vara i stort sett horisontell.
4. Fyllningsarbeten skulle äga rum i omedelbar anslutning till försöksområdet så att maskiner utan större kostnader kunde dirigeras till platsen.

Valet kom att falla på en höjdpunkt inom exploateringsområdet Oxievång inom Malmö kommun. Den naturliga jorden på platsen utgjordes av en siltmorän. Efter det att provytan satts ut avbanades matjorden mha schaktvagnar. Den frilagda siltmoränen packades genom 8 överfarter med samma vält som sedan användes för packning av fyllningen. Välten var försedd med compactometer varför compactometervärden avlästes var 5:e sekund. Efter packningen avvägdes hela provytan och täcktes med presenningar som skydd mot regn och önskad uttorkning.

Fyllningsarbetet avsågs drivas enligt nedanstående schema.

800624 Utläggning och packning med samtidig compactometerregistrering av skikt 1.

800625 Avvägning av skikt 1. Densitetsbestämning och skjuvvågshastighetsbestämning i skikt 1.

800626 Utläggning och packning med samtidig compactometerregistrering av skikt 2.

..

..

800708 Avvägning av skikt 6. Densitetsbestämning och skjuvvågshastighetsbestämning i skikt 6.

Avsikten var således att fyllningsarbetena skulle vara avslutade andra veckan i juli. Sommaren 1980 kom dock visa sig bli en av de regnigaste somrarna på många år. Arbete med fyllningen kom att ligga nere under i stort sett hela juli månad. Detta medförde att arbetena med fyllningen inte var avslutade förrän första veckan i september, vilket i sin tur innebar att hela det efterföljande försöksprogrammet försköts.

Fyllningsmassorna lades ut med en bandtraktor Caterpillar 951. Anledningen till att ett bandburet fordon användes var önskan att minimera den packningseffekt som fordonets upprepade förflyttningar på provytan gav upphov till. Att lägga ut massorna var ett tidsödande arbete pga den hårda styrning av massornas placering i planet som ur vetenskaplig synvinkel var nödvändig. De massor som, vid de fåtaliga dagar då det ej regnade, exponerats för sol och vind skulle styras till

delytorna C, D och E, för att där erhålla torrast möjliga massor. Ofta visade sig dock detta ej vara tillräckligt. Massorna inom C,D och E revs därför upprepade gånger efter utläggandet för att möjliggöra en ytterligare uttorkning. Strävan, vid utläggandet av massorna, var att de skulle läggas ut i sådan mängd att skikten efter föreskrivet packningsarbete skulle ha en tjocklek av ca 0.3 m. När massorna genom upprepade rivningar minskat sitt vatteninnehåll vidtog packningen av skiktet.

Vid packningen användes en körplan vilken återges i fig 5.5. Som framgår av figuren kom alla överfarter på så sätt att ske i en och samma riktning. Detta är beklagligt men oundvikligt då det ur praktisk synvinkel var omöjligt att förfara på annat sätt utan att samtidigt förlora kontrollen över hur stort packningsarbete de olika delytorna utsatts för. Samtidigt med packningsarbetet utfördes compactometermätningarna. Då den använda välten normalt inte var utrustad med compactometer satt en compactometer provisoriskt monterad på bakre delen av vältens bärram. Avläsningarna av compactometern tillgick så att en man gick bakom välten och noterade erhållna värden. Välten drogs av samma bandtraktor som användes till utläggandet och rivningen av fyllningsmassorna. En körhastighet av 3.6 km/h (1 m/s) eftersträvades vilket i praktiken innebar att bandtraktorn framfördes med fullt gaspådrag på lägsta växel. Den valda hastigheten tillsammans med den likaledes valda integrationstiden (5 s) för compactometern innebar att två compactometervärden erhöles vid en passage över en delyta. Vältens bredd var sådan att 6 passager erfordrades för att täcka en hel delyta. Detta medförde att 12 compactometervärden erhöles per delyta, skikt och överfart.

Avsikten var från början att provytan efter det att ett skikt packats och avvägts skulle övertäckas med presenningar. Detta förfarande fick dock omgående överges då det tog 3 man 2 h att täcka av fyllningen och 3 h att täcka över densamma. För att kompensera detta gavs fyllningens överyta en lutning så att avrinningen vid nederbörd skulle underlättas.

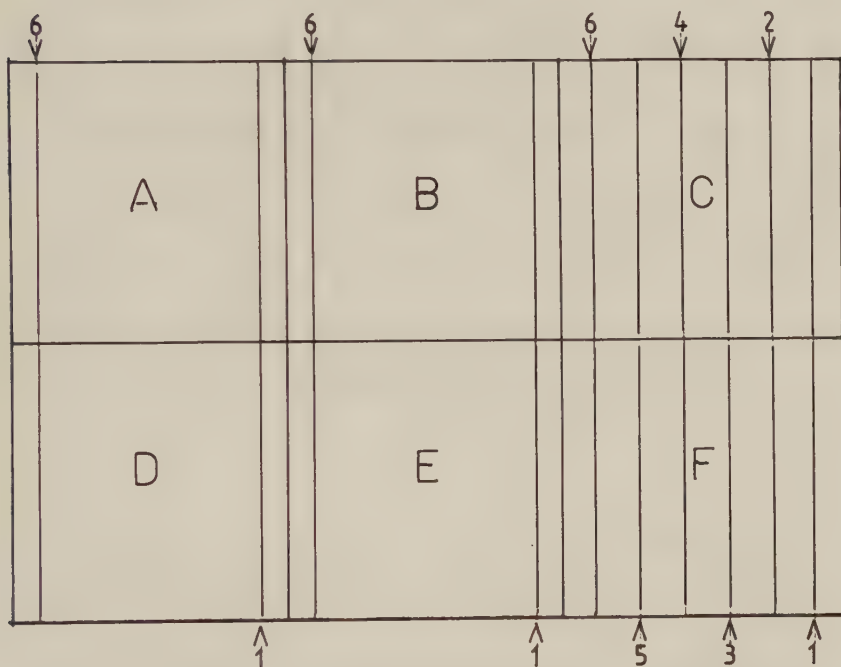


FIG 5.5 Körplan vid packning av fyllning.

5.2 Försöksutvärdering och försöksresultat

5.2.1 Densitet

De i fält med vattenvolymeter utförda densitetsbestämningarna uppvisade en variation i provvolym mellan 0.40 och $0.57 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$. I nedanstående frekvensdiagram, fig 5.6, är samtliga torrdensiteter medtagna, dvs totalt 180 mätvärden. Det är viktigt att komma ihåg att de 180 mätvärdena dock inte tillhör samma population. En uppdelning av mätvärdena i 6 populationer är logisk med tanke på att observationerna är gjorda inom de 6 ytorna A-F, vilka behandlats olika med avseende på kombination av vattenkvot och packningsarbete. Av speciellt intresse är att särskilja de våt- från de torrpackade ytorna, samt att kunna studera hur mängden packningsarbete återspeglas i torrdensiteten i de två fallen. Detta har gjorts i de två variansanalyserna nedan.

I dessa analyser ingår faktorerna

A=skiktnummer (1 till 6)

B=försöksnummer (1 till 5)

C=mängden packningsarbete (2,4 och 8 vältöverfarter)

Att skiktnummer förekommer som en faktor i analysen kan motiveras på två sätt. För det första är de 6 skikten utförda vid olika tidpunkter och därmed olika väderleksbetingelser, varför skillnader i torrdensitet mellan skikten kan vara en återspeglning av varierande vattenkvot. Dessutom kan den gradvisa förändringen av fastheten hos den jord, på vilken det skikt som observationen är gjord ur vilar, påverka effektiviteten i packningsarbetet och därmed den uppnådda torrdensiteten.

Valet av försöksnummer som faktor B är däremot snarast av metodteknisk natur. Någon signifikant inverkan av faktor B bör ej finnas.

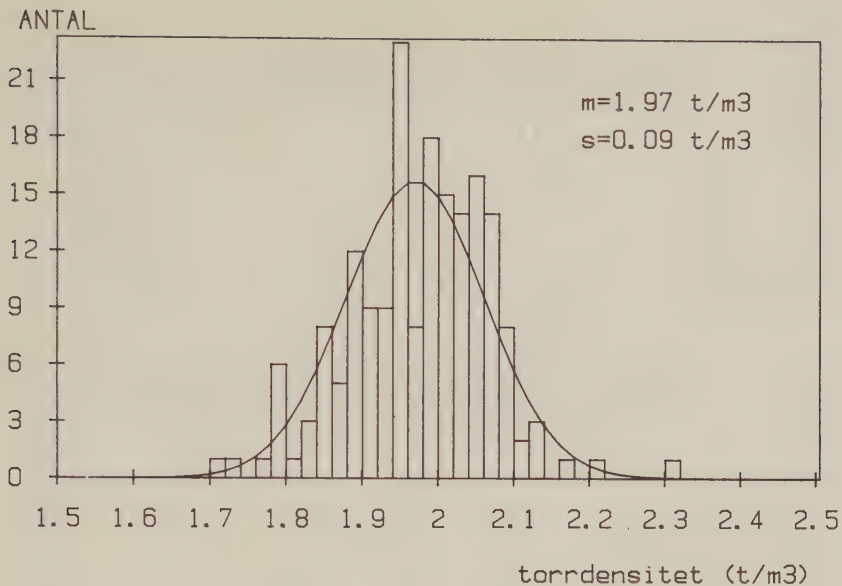


FIG 5.6 Frekvensdiagram över uppmätt torrdensitet för hela fyllningen.

Av varianstabellerna (tabell 5.1 och 5. 2) för våt- respektive torrpackad fyllning framgår det kanske något förvånande faktum att värdet på uppnådd torrdensitet är starkare beroende av från vilket skikt observationen härrör än av storleken på packningsarbetet. Av intresse kan även vara att notera de små skillnader i torrdensitet som existerar mellan våt- och torrpackad fyllning vid lika packningsarbete. Dessutom bör observeras att samtliga ytor i medeltal erhållit en packningsgrad av minst 89 % enligt tung laboratoriestampning.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (t/m ³)
A	5	6.29	★ ★ ★	A:1	1.94
B	4	1.58		A:2	1.94
AB	20	1.03		A:3	1.92
C	2	2.84		A:4	2.06
AC	10	1.51		A:5	1.95
BC	8	0.75		A:6	2.00
ABC	40			B:1	1.96
				B:2	1.94
				B:3	1.99
				B:4	1.99
				B:5	1.96
				C:1	1.95
				C:2	1.96
				C:3	2.00
				totalmedelvärde	1.97

Tabell 5.1 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för torrdensitet uppmätt i torrpackad fyllning.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (t/m^3)
A	5	4.01	★ ★	A:1	1.96
B	4	0.82		A:2	1.93
AB	20	1.16		A:3	1.92
C	2	1.84		A:4	2.01
AC	10	1.04		A:5	1.99
BC	8	1.29		A:6	2.02
ABC	40			B:1	1.96
				B:2	1.97
				B:3	1.98
				B:4	1.99
				B:5	1.95
				C:1	1.97
				C:2	1.95
				C:3	1.99
				totalmedelvärde	1.97

Tabell 5.2 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för torrdensitet uppmätt i våtpackad fyllning.

5.2.2 Vattenkvot.

Hur vattenkvoten varierar i fyllningen är av speciellt intresse då den indirekt är en av de styrande variablerna i undersökningen. Den direkta styrningen utgörs av om åtgärder vidtagits för att sänka fyllningsmassornas naturliga vattenkvot eller ej. Uttorkningen åstadkoms genom att fyllningsmassorna revs upprepade gånger efter utläggningen men före packningen. Det är lätt att inse att ett sådant förfarande inte resulterade i ett visst bestämt värde på vattenkvoten speciellt som variationer förekom i den naturliga vattenkvoten samt att väderleksbetingelserna ej var konstanta under fyllningens färdigställande.

Varianstabellerna (tabell 5. 3 och 5. 4) bekräftar ovan gjorda antaganden. De styrande variablerna (faktorerna) i dessa analyser är exakt desamma som i analyserna av torrdensiteten. De stora variationerna mellan skikten i den torrpackade fyllningen är särskilt påfallande. Ytterligare en viktig sak kan utläsas ur dessa analyser nämligen att i den torrpackade fyllningen existerade inga signifikanta skillnader i vattenkvot mellan ytor med olika packningsarbete. Detta är viktigt att beakta när eventuella skillnader i övriga egenskaper mellan dessa ytor skall förklaras. Det förtjänar att påpekas att skillnaden i medelvattenkvot mellan våt- och torrpackade ytor endast är ca 1.5 % - enheter.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (%)
A	5	33.69	★ ★ ★	A:1	10.4
B	4	0.17		A:2	8.1
AB	20	0.81		A:3	8.4
C	2	0.06		A:4	6.2
AC	10	7.77		A:5	7.5
BC	8	1.48		A:6	9.3
ABC	40			B:1	8.2
				B:2	8.4
				B:3	8.2
				B:4	8.4
				B:5	8.3
				C:1	8.4
				C:2	8.3
				C:3	8.3
				totalmedelvärde	8.3

Tabell 5.3 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för vattenkvot uppmätt i torrpackad fyllning.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (%)
A	5	3.16	★	A:1	9.9
B	4	0.81		A:2	9.2
AB	20	0.91		A:3	10.2
C	2	2.70		A:4	10.1
AC	10	2.64		A:5	9.7
BC	8	1.95		A:6	9.9
ABC	40			B:1	10.1
				B:2	9.7
				B:3	9.9
				B:4	9.8
				B:5	9.7
				C:1	10.1
				C:2	9.7
				C:3	9.7
				totalmedelvärde 9.8	

Tabell 5.4 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för vattenkvot uppmätt i våtpackad fyllning.

5.2.3 Compactometervärden.

Vid compactometermätningarnas utförande observerades att något egentligt utslag ej erhöles vid mätning på de våtpackade ytorna. Några slutsatser om compactometervärdets beroende av olika tänkbara faktorer kan därför ej göras för de våtpackade ytorna. För fullständighetens skull medtages ändå de våtpackade ytorna i variansanalysen.

De i variansanalysen ingående faktorerna utgöres av

A=försöksnummer (1 till 12)

B=skiktnummer (1 till 6)

C=packningsarbete (2,4 och 8 vältöverfarter)

Som beroende variabel i analyserna har valts compactometervärdena från den sista överfarten för respektive yta, dvs andra överfarten för yta B och E, fjärde överfarten för yta C och F samt åttonde överfarten för yta A och D. Av varianstabellen, tabell 5.5, för compactometervärden på torrpackade ytor framgår compactometervärdets starka beroende av från vilket skikt det härrör. Detta beroende är avsevärt starkare än beroendet av antal vältöverfarter. Compactometermedelvärdena för respektive skikt i den torrpackade fyllningen är låga i de två första skikten, något högre i det tredje och som högst i det femte skiktet. I det sjätte skiktet är det åter lågt, nästan på ursprunglig nivå. En jämförelse mellan vattenkvotens och compactometervärdets variation mellan skikten visar att compactometervärdets storlek är starkt kopplat till vattenkvotens storlek. Vid vattenkvoter som med 1-2 % överskrider materialets optimala vattenkvot erhålles inget adekvat värde. Att det högsta compactometermedelvärdet ej erhålles i det skikt där vattenkvoten är lägst kan förklaras genom inverkan av underliggande skikt. I det fjärde skiktet där vattenkvoten är lägst erhålles ett lägre värde än i femte skiktet beroende på att tredje skiktet är våtare och därmed mer plastiskt än det fjärde skiktet. Av varianstabellen och

kanske framförallt klassmedelvärdestabellen framgår att lägre compactometervärden erhöles på ytan med 4 överfarter än ytan med endast 2 överfarter. Det är dock fel att ur detta konstaterande dra slutsatsen att 4 överfarter generellt skulle resultera i lägre compactometervärden än 2 överfarter. Detta kan visas genom en variansanalys baserad på compactometervärdena efter 2 överfarter för yta C och E. Ur en sådan analys framgår att yta C som utsattes för totalt 4 vältöverfarter även efter 2 vältöverfarter uppvisade lägre compactometervärden än yta E, tabell 5.6.

Vad gäller de våtpackade ytorna A, B och F så uppvisar variansanalysen som väntat, med ett undantag, inga signifikanta avvikelser. Undantaget utgörs av faktorn försöksnummer. Som framgår av tillhörande klassmedelvärdestabell (tabell 5.7a) är alla värden erhållna vid udda försöksnummer högre än de som erhöles vid jämna. Detta kan förklaras av att värdena samlades två och två, med instrumentet avstängt däremellan. Det första värdet som erhöles efter det att instrumentet slagits på blev genomgående högre än värde nummer två efter påslagningen. Den troligaste förklaringen till detta torde ligga i instrumentets funktion.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (cmv)
A	9	3.24	★ ★	A:1	15.2
B	5	177.77	★ ★ ★	A:2	19.7
AB	45	1.22		A:3	20.7
C	2	27.19	★ ★ ★	A:4	18.9
AC	18	3.12		A:5	17.2
BC	10	13.23		A:6	20.2
ABC	90			A:7	20.9
				A:8	22.2
				A:9	15.7
				A:10	20.0
				B:1	9.0
				B:2	9.4
				B:3	14.3
				B:4	29.4
				B:5	41.1
				B:6	11.3
				C:1	17.7
				C:2	16.3
				C:3	23.2
				totalmedelvärde	19.1

Tabell 5.5 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för compactometervärden uppmätta i torrpäckad fyllning, vid sista överfarten på respektive yta.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (cmv)
A	9	3.27	★ ★	A:1	13.2
B	5	101.40	★ ★ ★	A:2	16.4
AB	45	1.07		A:3	19.1
C	2	6.17	★ ★	A:4	16.4
AC	18	2.91		A:5	15.7
BC	10	2.55		A:6	16.9
ABC	90			A:7	19.9
				A:8	20.2
				A:9	14.5
				A:10	17.6
				B:1	9.3
				B:2	9.5
				B:3	13.6
				B:4	26.2
				B:5	32.2
				B:6	11.2
				C:1	17.7
				C:2	15.1
				C:3	18.2
				totalmedelvärde 17.0	

Tabell 5.6 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för compactometervärden uppmätta i torrpäckad fyllning, vid 2:a överfarten på respektive yta.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (cmv)
A	9	13.62	★★★	A:1	10.2
B	5	6.20	★★	A:2	8.0
AB	45	1.29		A:3	11.2
C	2	2.15		A:4	8.1
AC	18	1.43		A:5	10.3
BC	10	0.64		A:6	8.1
ABC	90			A:7	12.4
				A:8	8.1
				A:9	10.6
				A:10	8.2
				B:1	8.7
				B:2	8.9
				B:3	9.0
				B:4	10.5
				B:5	10.6
				B:6	9.2
				C:1	9.3
				C:2	9.3
				C:3	9.9
				totalmedelvärde	9.5

Tabell 5.7 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för compactometervärden uppmätta i våtpackad fyllning, vid sista överfarten på respektive yta.

5.2.4 Skjuvvågshastighetsbestämningar

Av speciellt intresse att klarlägga är om och hur skjuvvågshastigheten varierar med vattenkvot samt förhållandet mellan vältningsriktning och skjuvvågens utbredningsriktning. Det är från tidigare undersökningar på sand känt att vältpackning ger upphov till horisontella spänningar i jorden som är olika stora vinkelrätt mot och parallellt med vältriktningen. De största spänningarna erhöles i denna undersökning, vinkelrätt vältriktningen, D'Appolonia et al (1969).

Variansanalyser har därför utförts med två olika indelningar av mätresultaten. I den första uppsättningen varianstabeller (tabell 5.8 och 5.9) har de våtpackade respektive torrpäckade ytor behandlats var för sig. På så sätt kan eventuella skillnader i skjuvvågshastighet vinkelrätt mot och parallellt med vältriktningen bäst studeras. Faktorerna i dessa båda analyser utgöres av

A=skiktnummer (1 till 6)

B=försöksnummer (1 till 5)

C=packningsarbete (2,4 och 8 vältöverfarter)

D=utbredningsriktning (parallellt respektive vinkelrätt vältriktningen)

Vad avser skjuvvågshastigheten på torrpäckade ytor är det, frånsett skiktnumrets starka inverkan, främst det mycket starka samspillet mellan faktorerna skiktnummer och packningsarbete (AC) som är noterbart. En jämförelse av klassmedelvärdena avslöjar mycket höga värden på skjuvvågshastigheten i fjärde och femte skiktet dvs de två skikt där de högsta compactometervärdena erhöles. Packningsarbetets inverkan som fristående faktor är något svagare än vad som skulle kunna förväntas. Något signifikant beroende, av utbredningsriktningen relativt vältningsriktningen, hos skjuvvågshastigheten existerar inte på de torrpäckade ytor.

Helt väntat har skiktnumret ej någon stark inverkan på skjuv-
vågshastigheten i de våtpackade fälten, eftersom vattenkvoten
för dessa ej styrdes av vädret (möjligheten till upptorkning)
i samma utsträckning som de torrpäckade ytorna. Några starka
samspelseffekter mellan två eller flera faktorer existerar ej
heller. Däremot tycks utbredningsriktningen relativt vält-
ningsriktningen ha en viss signifikant inverkan. Klassmedel-
värdestabellen , tabell 5.9b, avslöjar att utbrednings-
hastigheten i den våtpackade fyllningen är högre parallellt
med än vinkelrätt mot vältningsriktningen. Detta är värt att
notera med tanke på att förhållandet är det motsatta i den
torrpäckade fyllningen, tabell 5.8b.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (m/s)
A	5	11.51	★★★	A:1	246.3
B	4	0.93		A:2	317.3
AB	20	3.42		A:3	312.7
C	2	3.94	★	A:4	589.1
AC	10	5.39		A:5	539.8
BC	8	0.94		A:6	336.4
ABC	40	1.92		B:1	375.9
D	1	2.64		B:2	423.1
AD	5	1.91		B:3	350.6
BD	4	1.47		B:4	368.2
ABD	20	2.13		B:5	433.5
CD	2	3.11		C:1	423.8
ACD	10	2.88		C:2	323.8
BCD	8	1.07		C:3	423.2
ABCD	40			D:1	363.0
				D:2	417.5
				totalmedelvärde 390.3	

Tabell 5.8 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för skjuvvågshastigheter uppmätta i torrpäckad fyllning.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (m/s)
A	5	1.31		A:1	238.4
B	4	0.53		A:2	309.8
AB	20	0.93		A:3	332.1
C	2	1.67		A:4	341.2
AC	10	1.06		A:5	322.9
BC	8	1.24		A:6	302.3
ABC	40	0.92		B:1	308.3
D	1	4.65	★	B:2	321.2
AD	5	1.95		B:3	302.9
BD	4	0.69		B:4	275.1
ABD	20	1.17		B:5	331.5
CD	2	0.15		C:1	311.9
ACD	10	0.94		C:2	276.6
BCD	8	0.42		C:3	334.9
ABCD	40			D:1	336.1
				D:2	279.5
				totalmedelvärde 307.8	

Tabell 5.9 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för skjuvvågshastigheter uppmätta i våtpackad fyllning.

5.2.5 Viktsondering

Viktsondering är en ur utförandesynpunkt tilltalande metod att bestämma olika jordlagars fasthet. Den har ur utvärderingssynpunkt dock ett par stora svagheter. Den svaghet som är svårast att komma till rätta med, beroende på att den är en del av själva metoden, utgörs av sambandet mellan jordens hållfasthet eller kompressibilitet och jordens motståndskraft, mot den skruvande rörelse som viktsondspetsen beskriver. Den andra svagheten är mer historiskt betingad och utgörs av sättet att mäta sonderingsmotståndet. Att mäta antal halva varvs vridning för att uppnå en viss penetration var naturligtvis det enda tänkbara vid den tidpunkt då metoden togs i bruk. Med dagens teknik skulle metoden kunna göras betydligt stringentare, genom att istället kontinuerligt mäta och registrera det vridmoment som erfodras för att med en normerad hastighet driva sondspetsen nedåt. Genom ett sådant förfarande skulle två fördelar vinnas.

Det måste ur mekanisk synpunkt vara avsevärt enklare att finna en koppling mellan vridmotståndet och ex vis jordens hållfasthet än mellan denna hållfasthet och antal halva varv för en viss sjunkning. Dessutom erhålles ett kontinuerligt värde istället för ett värde framintegrerat över ett visst djup, med allt vad det betyder av informationsförluster.

Mot bakgrund av vad som framförts ovan är det rimligt att ej utföra någon analys av viktsonderingsdata före det att viss "manipulering" av rena rådata utförts. Vid viktsondering tillmätas ofta små lokala partier av fastare material ex vis småsten för stor betydelse, då en enstaka sten kan påverka det registrerade sonderingsmotståndet för hela 0.2 m. Tidigare när viktsondering var en manuell metod kunde sådana saker delvis avhjälpas genom noteringar i borrhprotokollen, eftersom personalen då hade möjlighet att höra och känna förekomsten av sten. Med dagens teknik där sondering utföres maskinellt och ej sällan med speciella borrhvagnar har den möjligheten kraftigt minskat.

I nedanstående analys har därför uppmätta extremvärden korrigerats nedåt enligt följande metod:

När enstaka mycket höga sonderingsmotstånd uppmäts har dessa reducerats på ett sätt som enklast beskrives med ett exempel. Vid sondering i fem punkter med lika förutsättningar erhöles följande värden

Tabell 5.10 Exempel på erhållna viktsonderingsmotstånd (hv/0.2 m) i fyllningen. Av tabellen framgår speciellt de ställvis erhållna mycket höga sonderingsmotstånden.

Försöks- nummer	Djup (m)										
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2
1	2	4	3	4	(17)	6	6	7	4	4	16
2	2	3	(34)	12	8	7	(37)	7	6	11	9
3	2	4	3	(42)	(29)	12	(32)	(15)	6	8	5
4	3	5	4	4	8	4	8	(32)	10	14	11
5	2	3	6	2	3	5	5	4	5	10	6
Medel- värde	2.2	3.8	4.0	5.5	6.3	6.8	6.3	6.0	6.2	9.4	9.4

De, i tabell 5.10, med () markerade värdena har med hänsyn till omgivande värden antagits vara extremvärden och ej representativa för jordens fasthet. Så är exempelvis värdet 34 vid $F=2$ och $D=0.6$ avsevärt högre än alla övriga värden på $D=0.6$ men även avsevärt högre än såväl $D=0.4$ och $D=0.8$ m för $F=2$. Det korrigerade värdet har därefter räknats fram genom ett viktningsförfarande. Först har medelvärden räknats fram för varje djup. I denna medelvärdesberäkning har endast medtagits de värden som ej klassats som extremvärden. Därefter har

kvoter bildats mellan värdena på djupen 0.4 och 0.8 m för $F=2$ respektive medelvärdena för dessa djup. Dessa kvoter har sedan summerats och summan delats med 2. Det på detta sätt erhållna talet har därefter multiplicerats med medelvärdet för djupet 0.6 m varvid det korrigerade värdet erhålles. Utryckt i siffror erhålles

$$(3/3.8+12/5.5)*4=6$$

På samma sätt har övriga extremvärden korrigerats varefter tabellen erhöill utseendet som framgår av tabell 5.11.

Det skall påpekas att den gjorda korrektionen av viktsondsdata ej är statistiskt fullfjädrad. De framräknade värdena borde egentligen justeras med ett tal som är ett slumpstal mellan -1 och +1 multiplicerat med två standardavvikelser.

Tabell 5.11 Exempel på korrigerade viktsonderingsmotstånd (hv/0.2 m) i fyllningen. De i tabell 5.10 mycket höga med () omgivna, värdena har ersatts med framräknade värden.

Försöks- nummer	Djup (m)										
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2
1	2	4	3	4	6	6	6	7	4	4	16
2	2	3	6	12	8	7	7	7	6	11	9
3	2	4	3	7	7	12	8	8	6	8	5
4	3	5	4	4	8	4	8	8	10	14	11
5	2	3	6	2	3	5	5	4	5	10	6

För fullständighetens skull har variansanalys utförts på såväl den okorrigerade som korrigerade värdemängden. De i variansanalysen ingående faktorerna utgöres i båda analyserna av

A=djup (0.2,0.4,,,,,,,,2.2 m)

B=försöksnummer (1 till 5)

C=packningsarbete (2,4 och 8 vältöverfarter)

D=vattenkvot (vått och torrt)

Genom en jämförelse av de båda analyserna, tabell 5.12 och 5.13, framgår att de gjorda korrektionerna resulterar i en kraftig minskning av slumpvariansen vilket i sin tur medför högre värden på testkvantiteterna. Speciellt bör den markanta ökningen i styrka av samspelet mellan faktorerna djup (nivå) och packningsarbete observeras. Detta förhållande talar för att den gjorda korrektionen var en riktig åtgärd eftersom just detta samspel visat sig starkt vid ex vis analysen av compactometervärdena. Därmed skulle analysen för de okorrigerade viktsonderingsvärdena kunna ställas åt sidan och intresset istället koncentreras till de korrigerade värdena. Testkvantiteterna från denna analys avslöjar att viktsonderingsvärdena starkt påverkats av faktorerna djup och framförallt vattenkvot. Dessutom visas på tämligen starka samspelseffekter mellan faktorerna djup, packningsarbete och vattenkvot. Dessa samspel kan bättre studeras om försöksdata delas i två delar på så sätt att sonderingsresultat erhållna i våtpackade respektive torrpäckade fyllningar analyseras var för sig. Detta är gjort i tabell 5.14a och 5.15a.

Ur dessa kan utläsas att faktorn A (djup) framförallt har en stark inverkan på sonderingsvärdet i torrpäckad fyllning. Detsamma är fallet för faktorn C (packningsarbete). Detta är helt i överensstämmelse med vad som erhöles vid analysen av compactometervärdena. Även förklaringen är densamma, dvs höga värden har erhållits i de skikt i den torrpäckade fyllningen som färdigställdes under gynnsamma väderleksbetingelser, dvs då en ordentlig upptorkning av jordmaterialet var möjlig. Detta kan även utläsas ur tabellerna 5.14b och 5.15b med klassmedelvärden där de aktuella skikten uppvisar mångdubbelt större sonderingsmotstånd än vad som uppmätts i den våtpäckade fyllningen.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (hv/0.2 m)
A	10	23.79	★ ★ ★	A:1	6.3
B	4	2.23		A:2	6.9
AB	40	0.92		A:3	18.6
C	2	4.65	★	A:4	19.5
AC	20	2.95		A:5	48.5
BC	8	3.16		A:6	28.6
ABC	80	0.96		A:7	28.2
D	1	172.85	★ ★ ★	A:8	13.6
AD	10	17.94		A:9	10.8
BD	4	2.52		A:10	12.4
ABD	40	0.94		A:11	10.3
CD	2	9.38		B:1	16.9
ACD	20	2.59		B:2	16.5
BCD	8	1.31		B:3	20.0
ABCD	80			B:4	16.8
				B:5	22.4
				C:1	18.8
				C:2	15.5
				C:3	21.2
				D:1	8.3
				D:2	28.7
				totalmedelvärde	18.5

Tabell 5.12 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för okorrigerade viktsonderingsmotsånd (hv/0.2 m) erhållna i hela fyllningen.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (hv/0.2 m)
A	10	43.69	★★★	A:1	4.8
B	4	0.61		A:2	6.9
AB	40	0.92		A:3	15.7
C	2	4.92	★★	A:4	16.5
AC	20	8.73		A:5	29.1
BC	8	3.00		A:6	21.6
ABC	80	0.97		A:7	17.0
D	1	525.21	★★★	A:8	11.7
AD	10	35.16		A:9	8.7
BD	4	2.14		A:10	11.2
ABD	40	0.96		A:11	9.5
CD	2	9.74		B:1	12.9
ACD	20	9.61		B:2	14.4
BCD	8	3.31		B:3	13.9
ABCD	80			B:4	14.0
				B:5	14.2
				C:1	13.2
				C:2	13.2
				C:3	15.3
				D:1	6.5
				D:2	21.3
				totalmedelvärde 13.9	

Tabell 5.13 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för korrigerade viktsonderingsmotstånd (hv/0.2 m) erhållna i hela fyllningen.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (hv/0.2 m)
A	10	44.10	★ ★ ★	A:1	7.0
B	4	1.43		A:2	9.9
AB	40	1.01		A:3	26.7
C	2	7.97	★ ★ ★	A:4	27.7
AC	20	10.40		A:5	50.4
BC	8	3.36		A:6	34.4
ABC	80			A:7	26.9
				A:8	16.3
				A:9	10.0
				A:10	13.9
				A:11	11.0
				B:1	18.6
				B:2	22.5
				B:3	21.6
				B:4	21.4
				B:5	22.5
				C:1	20.1
				C:2	19.1
				C:3	24.6
				totalmedelvärde 21.3	

Tabell 5.14 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för korrigerade viktsonderingsmotstånd (hv/0.2 m) erhållna i torrpäckad fyllning.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (hv/0.2 m)
A	10	8.14	★★★	A:1	2.5
B	4	1.14		A:2	3.9
AB	40	0.54		A:3	4.7
C	2	3.28	★	A:4	5.3
AC	20	0.83		A:5	7.9
BC	8	1.98		A:6	8.8
ABC	80			A:7	7.1
				A:8	7.2
				A:9	7.4
				A:10	8.5
				A:11	8.1
				B:1	7.3
				B:2	6.3
				B:3	6.3
				B:4	6.6
				B:5	5.9
				C:1	6.2
				C:2	7.3
				C:3	6.0
				totalmedelvärde	6.5

Tabell 5.15 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för korrigerade viktsonderingsmotstånd (hv/0.2 m) erhållna i våtpackad fyllning.

5.2.6 Vingsondering

Med tanke på att vingsondering är en metod för att bestämma den odränerade skjuvhållfastheten i kohesionsjord kan dess användande i blandjordar såsom ex vis lermorän vara diskutabel. Man bör därför undvika att tolka det erhållna värdet som ett mått på skjuvhållfastheten. Att tolka det som ett fasthetsmått torde dock vara acceptabelt. Även om vingen under vridningsfasen nästan undantagslöst kommer att påverkas av mer eller mindre stora stenar vilka måste trängas undan för att möjliggöra vingens rotation, så bör den del av momentet som åtgår till att åstadkomma denna stenundanträngning vara relaterad till fastheten hos den jordmassa i vilken stenarna finns. De angivna värdena på vingsonderingsmotståndet är uträknade på samma sätt som skjuvhållfastheten normalt görs men kommer fortsättningsvis att anges utan sort för att markera att de ej skall tolkas som hållfasthetsvärden.

Trots att den använda vingen var en sk V-5 vinge (HxD=100x50 mm) så har maxutslag på registreringsinstrumentet erhållits vid ett antal tillfällen under sonderingarna. Dessa mycket höga uppmätta fastheter torde i huvudsak kunna sägas bero på att brottytan runt vingen i dessa fall "genomskurit" större stenar. Om så är fallet så har det ingen större betydelse att högre värden ej kunnat registreras, då dessa ändå ej är representativa.

I den utförda variansanalysen ingår följande faktorer

A=djup under my (0.45,0.75,1.05,1.35,1.65,1.95 och 2.25)

B=försöksnummer (1 till 5)

C=packningsarbete (2,4 och 8 vältöverfarter)

D=vattenkvot (vått och torrt)

Analysen, tabell 5.16, visar att såväl packningsarbete som vattenkvot utövar en stark inverkan på fastheten mätt med vinge. Dessutom är djupet vid vilken bestämningen är gjord av betydelse för fastheten. Denna inverkan är dock att hänföra

till avvikande värden på djupen 0.45 och 1.95 m. På övriga nivåer är fastheten relativt konstant och fluktuerar runt 160. På djupet 0.45 m är fastheten i medeltal 115, medan den på djupet 1.95 m är ca 200. Det höga värdet på djupet 1.95 m kan förklaras av att denna bestämning är gjord inte i fyllningen utan i naturligt lagrad jord.

Den utförda variansanalysen pekar även på ett starkt samspel mellan faktorerna packningsarbete och vattenkvot. För att närmare studera detta samspel utfördes analyser av varianserna med försökmängderna från försök utförda i våt- respektive torrpackad fyllning separerade. Faktorerna i dessa analyser, tabell 5.17 och 5.18, var desamma som för hela materialet. I analysen av försöken i den våtpackade fyllningen är det mest påtagliga att packningsarbetets storlek spelar relativt liten roll för fastheten. Den inverkan som trots allt finnes är att fastheten är störst när antalet vältöverfarter är 4. Vid 2 och 8 vältöverfarter är fastheten ca 15 enheter lägre än vid 4. För det torrpackade materialet äger däremot packningsarbetet stort inflytande över fastheten som ökar starkt med ökat antal vältöverfarter. Väl värd att notera är den stora skillnaden i uppmätt fasthet mellan våt- och torrpackad fyllning och hur denna skillnad beror av mängden packningsarbete. I torrpackad fyllning resulterar 2 vältöverfarter i ett medelvärde på fastheten av 100 enheter medan motsvarande packningsarbete i den våtpackade fyllningen ger en fasthet av 177 enheter i medeltal. Ökas packningsarbetet minskar differensen i fasthet till 25 enheter vid 4 vältöverfarter och vid 8 vältöverfarter finns ej längre någon skillnad. Denna omständighet är speciellt intressant med tanke på att fasthetsbestämningar med vingsond ofta utförts som kontroll vid fyllningsarbeten med finkornig packad jord. Ett i detta sammanhang ofta använt kontrollkriterium är att fastheten skall vara minst 100 enheter, något som samtliga försöksfält (i denna undersökning) i medeltal uppfyller. Med tanke på hur olika resultat som erhållits vid plattbelastningsförsöken på de olika försöksfälten (vilket redovisas längre fram) är det lätt att inse att detta kontrollkriterium ej garanterar att den färdiga fyll-

ningen är homogen eller uppvisar speciellt goda kompressions-egenskaper. En mer fullständig jämförelse görs längre fram under avsnittet 8.2.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (FV)
A	6	22.18	★★★	A:1	115.0
B	4	3.13	★	A:2	156.6
AB	24	0.80		A:3	160.9
C	2	32.66	★★★	A:4	166.1
AC	12	3.84		A:5	160.6
BC	8	2.53		A:6	205.6
ABC	48	1.08		A:7	188.0
D	1	58.92	★★★	B:1	174.8
AD	6	4.52		B:2	167.3
BD	4	1.52		B:3	170.7
ABD	24	0.70		B:4	156.3
CD	2	23.82		B:5	154.4
ACD	12	3.80		C:1	139.0
BCD	8	4.16		C:2	180.3
ABCD	48			C:3	174.8
				D:1	182.1
				D:2	147.3
					totalmedelvärde 164.7

Tabell 5.16 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för vingsonderingsvärden erhållna i hela fyllningen.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (FV)
A	6	10.36	★ ★	A:1	107.3
B	4	2.38		A:2	146.8
AB	24	0.74		A:3	130.4
C	2	37.10	★ ★	A:4	134.1
AC	12	4.45		A:5	131.0
BC	8	4.06		A:6	203.6
ABC	48			A:7	177.9
				B:1	155.0
				B:2	159.4
				B:3	156.2
				B:4	134.8
				B:5	131.1
				C:1	100.6
				C:2	167.2
				C:3	174.1
				totalmedelvärde 147.3	

Tabell 5.17 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för vingsonderingsvärden erhållna i torrpackad fyllning.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (FV)
A	6	18.38	★★★	A:1	122.7
B	4	1.92		A:2	166.4
AB	24	0.70		A:3	191.5
C	2	4.86	★	A:4	198.1
AC	12	1.93		A:5	190.2
BC	8	1.33		A:6	207.7
ABC	48			A:7	198.1
				B:1	194.7
				B:2	175.1
				B:3	185.2
				B:4	177.8
				B:5	177.7
				C:1	177.3
				C:2	193.4
				C:3	175.6
				totalmedelvärde	182.1

Tabell 5.18 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för vingsonderingsvärden erhållna i våtpackad fyllning.

5.2.7 Spetstrycksondering

Spetstrycksonderingen skiljer sig från övriga sonderingsmetoder i ett viktigt avseende, genom att information om jordens fasthet fås kontinuerligt. Beroende på typen av registreringsinstrument kan därför en mer eller mindre kontinuerlig bild av jordens fasthet erhållas. Detta innebär flera fördelar gentemot övriga metoder bl a tillmäts lokala partier av fastare material inte så stor betydelse eftersom värdet representerar fastheten i en diskret punkt och inte som vid ex vis viktsondering ett 0.2 m brett djupintervall.

För att på ett enkelt sätt kunna jämföra resultatet från en spetstrycksondering med resultatet från en viktsondering eller för att kunna tilldela en viss jordmättighet ett explicit värde på sonderingsmotståndet, krävs dock att den erhållna spetstryckkurvan utsätts för viss bearbetning. Detta är gjort så att de erhållna spetstryckkurvorna, efter ha digitaliserats och lästs in i dator, integrerats numeriskt. Denna integration har gjorts över två olika djupintervall nämligen 0.2 och 0.3 m. Det framintegrerade värdet har sedan dividerats med den aktuella intervallbredden varvid ett medelvärde för spetstrycket i intervallet erhållits. Intervallbredden 0.2 m har valts för att möjliggöra jämförelse med viktsonderingsresultaten medan intervallbredden 0.3 m är vald för att överensstämma med den teoretiska skikttjockleken i fyllningen. Dessa, enligt ovan, framräknade värden har därefter använts som indata i de variansanalyser som följer.

De faktorer som ingår i analyserna är

A=skiktnummer (6 till 1)

B=försöksnummer (1 till 5)

C=packningsarbete (2,4 och 8 vältöverfarter)

D=vattenkvot (vått och torrt)

Av analysen, tabell 5.19, framgår framförallt vattenkvotens stora betydelse för storleken på spetstrycket. Dessutom kan relativt starka influenser konstateras för faktorerna skikt-nummer och packningsarbete. För att på ett bättre sätt kunna särskilja egenskaper specifika för den våt- respektive torrpäckade fyllningen, har ytterligare två analyser utförts där försöksdata från dessa separerats.

I dessa båda analyser, tabell 5.20 och 5.21, är det framförallt faktorn packningsarbete som uppvisar intressanta effekter. Packningsarbetet är nämligen den faktor som framförallt visar sig vara av betydelse men kanske inte på ett sådant sätt som varit väntat. En jämförelse av klassmedelvärdena inom faktorn packningsarbete avslöjar nämligen att den starka signifikansen hos denna faktor har sin förklaring i de höga spetstryck som erhållits där packningsarbetet varit 4 vältöverfarter relativt såväl 2 som 8 vältöverfarter. Lika entydig som ökningen i spetstryck är vid en ökning av antal överfarter från 2 till 4, lika entydig är minskningen vid en ytterligare ökning till 8 överfarter, speciellt i den våtpäckade fyllningen. Effekten finns även i den torrpäckade fyllningen men något mindre markant. Detta förhållande låter sig inte omedelbart förklaras.

För att underlätta jämförelser mellan spetstrycksondsvärden och viktsondsvärden vilket görs längre fram i kapitel 8 så har även en variansanalys med spetstrycksondsvärden framintegrerade över 0.2 m intervallsbredd genomförts. Faktorerna har varit desamma som i de föregående analyserna men faktorn A (skikt) innehåller 11 istället för som tidigare 6 nivåer, tabell 5.22.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (MPa)
A	5	14.07	★ ★ ★	A:1	2.1
B	4	0.71		A:2	3.7
AB	20	0.51		A:3	5.1
C	2	9.62	★ ★ ★	A:4	5.2
AC	10	6.47		A:5	4.5
BC	8	2.61		A:6	3.5
ABC	40	1.15		B:1	3.8
D	1	116.71	★ ★ ★	B:2	4.2
AD	5	5.15		B:3	4.3
BD	4	1.19		B:4	4.0
ABD	20	0.64		B:5	3.7
CD	2	1.66		C:1	3.4
ACD	10	1.87		C:2	4.8
BCD	8	3.82		C:3	3.8
ABCD	40			D:1	2.6
				D:2	5.4
				totalmedelvärde 4.0	

Tabell 5.19 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, baserade på spetstryck (MPa) uppmätta i hela fyllningen men omräknade till medelvärden över 0.3 m djupintervall.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (MPa)
A	5	9.29	★ ★ ★	A:1	2.5
B	4	0.89		A:2	5.0
AB	20	0.45		A:3	7.1
C	2	4.18	★	A:4	7.4
AC	10	3.78		A:5	6.1
BC	8	3.09		A:6	4.2
ABC	40			B:1	5.1
				B:2	5.9
				B:3	6.0
				B:4	4.0
				B:5	4.9
				C:1	4.5
				C:2	6.3
				C:3	5.4
				totalmedelvärde	5.4

Tabell 5.20 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, baserade på spetstryck (MPa) uppmätta i torrpackad fyllning men omräknade till medelvärden över 0.3 m djupintervall.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (MPa)
A	5	5.82	★ ★ ★	A:1	1.7
B	4	0.82		A:2	2.4
AB	20	1.23		A:3	3.1
C	2	14.13	★ ★ ★	A:4	3.0
AC	10	4.65		A:5	2.8
BC	8	2.11		A:6	2.7
ABC	40			B:1	2.6
				B:2	2.5
				B:3	2.6
				B:4	2.9
				B:5	2.5
				C:1	2.4
				C:2	3.3
				C:3	2.2
				totalmedelvärde	2.6

Tabell 5.21 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, baserade på spetstryck (MPa) uppmätta i våtpackad fyllning men omräknade till medelvärden över 0.3 m djupintervall.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (MPa)
A	10	11.06	★ ★ ★	A:1	1.9
B	4	0.82		A:2	2.7
AB	40	0.59		A:3	4.1
C	2	8.02	★ ★ ★	A:4	4.8
AC	20	5.14		A:5	5.7
BC	8	2.97		A:6	4.9
ABC	80	0.95		A:7	4.6
D	1	150.56	★ ★ ★	A:8	3.9
AD	10	4.84		A:9	3.4
BD	4	1.34		A:10	3.1
ABD	40	0.61		A:11	3.3
CD	2	2.80		B:1	3.7
ACD	20	1.46		B:2	4.0
BCD	8	4.41		B:3	4.1
ABCD	80			B:4	3.8
				B:5	3.6
				C:1	3.4
				C:2	3.4
				C:3	4.4
				D:1	3.8
				D:2	5.1
				totalmedelvärde 3.9	

Tabell 5.22 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, baserade på spetstryck (MPa) uppmätta i hela fyllningen men omräknade till medelvärden över 0.2 m djupintervall.

5.2.8 Pressometermodul och kryptryck

Ur pressometerförsök kan tre olika storheter i normalfallet utvärderas, nämligen pressometermodul, gränstryck och kryptryck. Den sk pressometermodulen kan teoretiskt härledas ur ekvationen för expansion av ett cylindriskt hålrum i ett oändligt medium. Ur pressometerkurvan utvärderas pressometermodulen från dess räta del mellan v_0 och v_f dvs från det att tuben ligger an mot hålväggarna och till den volym som svarar mot det tryck vid vilket krypningen i jordmassan accelererar, kallat kryptrycket. Gränstrycket motsvaras av det tryck vid vilket hålets ursprungliga volym fördubblats. Det är vanligt att försöket ej kan drivas så långt att en fördubbling av den ursprungliga hålvolymen uppnås pga att den tillgängliga vattenvolymen är otillräcklig. När detta inträffar bestäms gränstrycket genom att den erhållna pressometerkurvan extrapoleras upp till en fördubbling av ursprungliga hålvolymen. Detta kan göras visuellt direkt ur pressometerkurvan, eller kan matematiska hjälpmetoder användas. Den vanligaste av dessa är den sk log-log metoden men med det ökade användandet av datorer följer ett ökat användande av Leme's metod. Nedan följer en kort beskrivning av dessa båda metoder.

log-log metoden

Vid användandet av denna metod plottas det korrigerade pressometertrycket mot variabeln

$$X = (v_i - v_0) / (v_c + v_0) \quad (5.10)$$

på ett dubbellogaritmiskt papper. Punkterna kommer då att hamna på en nära nog rät linje vilken extrapoleras till

$$X=1$$

vid vilket det tryck avläses som får motsvara gränstrycket.

v_i = volymökning hos mätcellen

v_0 = skillnaden mellan hålvolum och initiell cellvolym

V_c = initiell cellvolym

Lemée's metod

Enligt Lemée kan pressometerkurvan beskrivas med ekvationen

$$p = (b \cdot v^2 + a \cdot c) / (v^2 + a) \quad (5.11)$$

där

p = trycket mot hålets väggar

v = hålets volym

a, b och c är konstanter

Konstanten c kan bestämmas genom att låta kurvan passera genom punkten (p_e, v_e) på den verkliga pressometerkurvan. Den teoretiska kurvan transformeras därefter till en rät linje med ekvationen

$$X = b \cdot Y - a \quad (5.12)$$

genom att sätta

$$X = (p \cdot v^2 - p_e \cdot v_e^2) / (p - p_e) \quad (5.13)$$

och

$$Y = (v^2 - v_e^2) / (p - p_e) \quad (5.14)$$

Konstanterna a och b kan därefter bestämmas mha linjär regression. Genom att därefter i ekvation (5.11) sätta

$$v = V_c + 2 \cdot v_0 \quad (5.15)$$

så kan gränstrycket bestämmas.

Genom gjorda jämförelser har man funnit att i relation till manuellt utvärderade gränstryck så erhålles i allmänhet med log-log metoden för höga värden medan Leme's metod ger för låga värden. Genom att kombinera de båda metoderna bör alltså en relativt god uppfattning om gränstrycket erhållas. Om differensen i gränstryck erhållna med de båda metoderna är mindre än 10% av det med Leme's metod erhållna gränstrycket så kan detta gränstryck anses riktigt. Är däremot avvikelsen större än 10% så tyder detta på att en för lång extrapolering vidtagits och det erhållna värdet får ej utan vidare anammas.

Den tredje storheten som kan utvärderas ur pressometerförsöket är det sk kryptrycket. Detta kan utvärderas direkt från pressometerkurvan som det tryck över vilket kurvan ej längre kan beskrivas med en rät linje. Ofta är det dock svårt att klart kunna definiera denna punkt varför den vid försöket uppmätta krypningen användes för bestämmandet av kryptrycket. Detta göres genom att i intervallet 30 till 60 s uppmätt krypning plottas mot trycket. På så sätt erhålles en kurva med en brytpunkt vid vilken krypningen kraftigt ökar. Detta tryck anses då motsvara kryptrycket.

Av vad som hittills sagts om utvärderingen av olika storheter ur ett pressometerförsök kan förstås att detta är en omständlig och tidsödande procedur väl lämpad för datorbearbetning. Under författarens handledning har som ett examensarbete (Carlsson, A., Pressometer-Program för utvärdering av pressometerförsök med hjälp av dator, 1981) utvecklats ett program för utvärdering av pressometerförsök. Programmet som är skrivet i Fortran 77 ombesörjer samtliga led i ut-

värderingen av ett pressometerförsök. Indata utgöres av fältprotokollet. Dessutom skall den använda probens kalibreringskurva matas in. Pressometerkurvan ritas upp och pressometermodul och gränstryck beräknas. I samma diagram som pressometerkurvan plottats, plottas även krypningen i tidsintervallet 30 till 60 s. Utvärderingen av kryptrycket får göras manuellt med denna plott som underlag.

Det program som i grova drag återgetts ovan har använts för utvärderingen av de ca 200 pressometerförsök som utförts. Anledningen till att fler försök än de teoretiskt 150 nödvändiga utförts är att vissa försöksserier ej ansågs tillförlitliga då de förborrade hålen i dessa fall stått öppna oacceptabelt länge och i vissa fall även vattenfyllets. Av praktiska och ekonomiska skäl var det nämligen nödvändigt att förborra den kommande arbetsdagens samtliga hål redan på morgonen. Om det på morgonen förväntade antalet pressometerförsök pga ex vis apparathaveri ej kunde genomföras kom vissa hål att stå öppna väl länge. Dessa hål användes dock men en kompletterande försöksserie utfördes avslutningsvis för den händelse att de förstnämnda försöken vid den senare utvärderingen skulle visa sig oanvändbara.

Generellt kan sägas att gränstrycket ej varit möjligt att beräkna ur de utförda försöken. Anledningen till detta var att försöken ej kunnat drivas tillräckligt långt i deformationshänseende då det i utrustningen använda vattenmagasinet var otillräckligt. Det i sin tur berodde på att de förborrade hålen blev något stora i förhållande till proben. Även utvärderingen av kryptrycket blev av detta skäl för många försök mycket osäker. I några fall kunde ej någon brytpunkt på krypkurvan konstateras varvid det under försöket högsta trycket valdes till kryptryck.

Såväl pressometermodul som kryptryck har analyserats mha variansanalys.

Faktorerna i dessa analyser var

A=nivå (0.45,0.75,1.05,1.35,1.75 m djup under markytan)

B=försöksnummer (1 till 5)

C=packningsarbete (2,4 och 8 vältöverfarter)

D=vattenkvot (vått,torrt)

Pressometermodul

Variansanalysen, tabell 5.24, av de uppmätta pressometermodulerna visar att vattenkvoten äger ett starkt inflytande över dessa modulers storlek. Det finns därför anledning att göra en analys där de olika vattenkvoterna separerats från varandra. En sådan analys, tabell 5.25 och 5.26, avslöjar att det för den våtpackade fyllningen saknas faktorer med signifikant inverkan på modulen. För de torrpäckade ytorna kan däremot två faktorer med signifikant inverkan konstateras. Framförallt visar sig packningsarbetet ha en stark inverkan på storleken av pressometermodulen, men även djupet under markytan. Den sistnämnda effekten stämmer väl med vad som kunnat utläsas ur analyser av resultat från andra försökstyper. En jämförelse av klassmedelvärdena påvisar att den erhållna pressometermodulen ökar med ökande antal vältöverfarter för den torrpäckade fyllningen. Klassmedelvärdena för den våtpäckade fyllningen indikerar att en sänkning av pressometermodulen erhålles om antalet vältöverfarter ökas från 4 till 8, men detta är osäkert då faktorn packningsarbete ej är signifikant i detta fall.

Kryptryck

Vad gäller kryptryckets beroende av packningsarbete och vattenkvot så är bilden densamma som för pressometermodulen, nämligen ett starkt vattenkvotsberoende och ett mycket svagt beroende av mängden packningsarbete, tabell 5.27. En analys där de olika vattenkvoterna separerats, tabell 5.28 och 5.29,

visar att i den våtpackade fyllningen är kryptrycket okänsligt för mängden packningsarbete. I den torrpackade fyllningen har däremot mängden packningsarbete stor betydelse för storleken på kryptrycket.

Det mest anmärkningsvärda med resultaten från pressometerförsöken är att såväl modul som kryptryck är otvetydigt högst i den våtpackade fyllningen. En orsak till detta kan vara att pressometerförsöken ur belastningssynpunkt är snabba försök varför odränerade förhållanden kan förmodas råda i ett så pass tätt material som siltmorän. Detta skulle främst påverka resultaten från den våtpackade fyllningen, där belastningen från pressometern kan ge upphov till porvatten- eller porgas-tryck i omgivande jord, vilken därmed får en styvare och kryptningströgare karaktär.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (MPa)
A	4	1.33		A:1	2.4
B	4	0.83		A:2	2.0
AB	16	0.60		A:3	2.4
C	2	3.47	★	A:4	2.0
AC	8	1.15		A:5	2.0
BC	8	1.31		B:1	2.2
ABC	32	0.88		B:2	2.3
D	1	73.30	★★★	B:3	1.9
AD	4	2.20		B:4	2.3
BD	4	0.44		B:5	2.2
ABD	16	0.62		C:1	1.9
CD	2	1.44		C:2	2.4
ACD	8	3.84		C:3	2.3
BCD	8	1.10		D:1	2.9
ABCD	32			D:2	1.4
totalmedelvärde					2.2

Tabell 5.24 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för pressometermoduler (MPa) erhållna i hela fyllningen.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (MPa)
A	4	5.11	★ ★	A:1	2.2
B	4	0.97		A:2	1.1
AB	16	0.75		A:3	1.5
C	2	6.94	★ ★	A:4	1.1
AC	8	6.66		A:5	1.4
BC	8	0.95		B:1	1.4
ABC	32			B:2	1.4
				B:3	1.2
				B:4	1.7
				B:5	1.5
				C:1	1.0
				C:2	1.5
				C:3	1.8
				totalmedelvärde	1.4

Tabell 5.25 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för pressometermoduler (MPa) erhållna i torrpackad fyllning.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (MPa)
A	4	0.71		A:1	2.7
B	4	0.57		A:2	3.0
AB	16	0.61		A:3	3.3
C	2	1.05		A:4	2.8
AC	8	1.21		A:5	2.6
BC	8	1.40		B:1	2.9
ABC	32			B:2	3.3
				B:3	2.6
				B:4	2.9
				B:5	2.9
				C:1	2.7
				C:2	3.2
				C:3	2.8
				totalmedelvärde 2.9	

Tabell 5.26 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för pressometermoduler (MPa) erhållna i våtpackad fyllning.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (kPa)
A	4	1.02		A:1	188.5
B	4	0.27		A:2	163.0
AB	16	1.11		A:3	208.0
C	2	4.28	★	A:4	188.0
AC	8	2.38		A:5	197.3
BC	8	0.56		B:1	197.3
ABC	32	0.53		B:2	190.2
D	1	69.45	★ ★ ★	B:3	178.7
AD	4	2.56		B:4	181.8
BD	4	0.70		B:5	196.8
ABD	16	0.55		C:1	162.5
CD	2	2.99		C:2	189.0
ACD	8	1.75		C:3	215.4
BCD	8	0.77		D:1	250.5
ABCD	32			D:2	127.5
				totalmedelvärde	189.0

Tabell 5.27 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för kryptryck (kPa) utvärderade från pressometerförsök utförda i hela fyllningen.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (kPa)
A	4	2.85	★	A:1	169.0
B	4	0.27		A:2	84.7
AB	16	0.98		A:3	120.0
C	2	11.73	★★★	A:4	123.0
AC	8	4.87		A:5	140.7
BC	8	0.65		B:1	134.0
ABC	32			B:2	117.7
				B:3	123.3
				B:4	140.7
				B:5	121.7
				C:1	80.6
				C:2	124.4
				C:3	177.4
				totalmedelvärde	127.5

Tabell 5.28 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för kryptryck (kPa) utvärderade från pressometerförsök utförda i torrpäckad fyllning.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (kPa)
A	4	1.98		A:1	208.0
B	4	0.87		A:2	241.3
AB	16	1.15		A:3	296.0
C	2	0.09		A:4	253.0
AC	8	1.24		A:5	254.0
BC	8	1.02		B:1	260.7
ABC	32			B:2	262.7
				B:3	234.0
				B:4	223.0
				B:5	272.0
				C:1	244.4
				C:2	253.6
				C:3	253.4
				totalmedelvärde 250.5	

Tabell 5.29 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för kryptryck (kPa) utvärderade från pressometerförsök utförda i våtpackad fyllning.

5.2.9 Fallviktsförsök

De data som erhöjls lagrade på hålremsa från fallvikttretardationsm tningarna utvärderades såsom tidigare angivits med ett för ändamålet framtaget datorprogram. Den i varje tidsögonblick uppmätta retardationen tillsammans med uppgifter om fallhöjden f r vikten samt viktens massa användes för framr knandet av viktens hastighet och tillryggalagda sträcka efter markislaget samt den resulterande kraften på vikten. Härur kunde även en spännings-deformationskurva framtagas för varje enskilt försök. Då misstanke förelåg om att den dubbla numeriska integrationen av den uppmätta retardationen, som krävdes för bestämmandet av deformationen, skulle kunna ge upphov till betydande fel i deformationsbest mningen, lades en speciell kontroll in i programmet. Denna kontroll bestod i en jämförelse av viktens lägesenergi innan fallet med den energi som åtgick för att deformera jorden vid islaget. Denna energi bestämdes genom ytterligare en numerisk integration, denna gång av spännings-deformationskurvan. Genom att integrera spännings-deformationskurvan över deformationen och multiplicera det erhållna värdet med viktens tvärsnittsarea erh lls den till jorden överförda energin. Tanken var att om den på detta sätt framräknade energin väl stämde överens med den ursprungliga lägesenergin, så kunde försöken och f rs ksutv rderingen ej vara behäftade med några grova fel. Något  v raskande visade det sig att kvoten mellan till jorden överförd energi och ursprunglig lägesenergi med två decimalers noggrannhet var 1.00 f r den övervägande delen av försöken. När avvikelser erhöjls var dessa av storleksordningen 1 till 2 enheter i andra decimalen. Denna utm rkt  överensstämmelse  r särskilt  v raskande med tanke på att vikten vid så gott som samtliga försök hade en resthastighet n r retardationen var noll och således kontakttrycket mellan vikt och jord lika med det statiska trycket. Om kontakttrycket  r lika med det statiska trycket b r det innebära att vikten befinner sig i vila och därmed har hastigheten noll. Någon rimlig förklaring till denna diskrepans har ej varit möjlig att finna inom ramen

för utförda undersökningar. Det är trots detta "intellektuella skoskav" författarens mening att sådan tillit kan sättas till de utförda försöken att de fyller sin uppgift, nämligen att ligga till grund för bedömningar om hurvida metoden ger ett resultat som på ett relevant sätt ger upplysningar om den undersökta jordvolymens fasthet.

Det använda datorprogrammet ritade således upp det framräknade spännings- deformationssambandet samt bestämde sekant- och tangentmoduler till kurvan vid jämna hundratal kPa grundtryck med början vid 200 kPa upp till i förekommande fall 1800 kPa. Tangentmodulen bestämdes med hjälp av linjär regression omfattande 21 punkter på kurvan - 10 före och 10 efter den aktuella punkten.

Tangentmodulen, utvärderad vid tre spänningsnivåer, är den parameter som använts för den statistiska analysen av försöksdata. Någon statistik analys av sekantmodulen har ej gjorts då en sådan analys ej bedömdes ge något nytt utöver vad analysen av tangentmodulen visar. För att erhålla en bild av spänningsnivåns inverkan på modulernas storlek vid olika förhållanden (vattenkvot och packningsarbete) har spänningsnivån medtagits i analysen.

De i analyserna ingående parametrarna utgöres därför av

A=försöksnummer(1 till 5)

B=packningsarbete (2,4 och 8 vältöverfarter)

C=spänningsnivå (200,400 och 600 kPa grundtryck)

D=vattenkvot (vått och torrt)

Vid försöken med 0.2 m fallhöjd omfattar faktorn C endast 200 och 400 kPa då ej alla försök med denna fallhöjd uppnått grundtryck över 600 kPa.

Ur varianstabellen (tabell 5.30a) för försöken med 0.2 m fallhöjd kan följande iakttagelser göras. Faktorerna packningsarbete och spänningsnivå äger ett starkt inflytande över den uppmätta tangentmodulen medan faktorn vattenkvot något förvånande endast svagt påverkar tangentmodulens storlek. Av klassmedelvärdena framgår att packningsarbetets starka inverkan har sin förklaring i de höga moduler som uppmätts vid 4 vältöverfarter. Dessa moduler är ca 70 % större än de moduler som uppmätts vid såväl 2 som 8 vältöverfarter. Spänningsnivåns inverkan på modulen är bakvänd dvs modulen ökar med ökande spänning. Detta kan tyckas förbryllande men kan förklaras av att det ytliga jordskiktet luckrades upp i samband med avschakten av fyllningens översta skikt, vilket togs bort för att inte det klimatpåverkade övre skiktet skulle suddas ut de eventuella skillnader som existerade mellan de olika packade ytorna. När vikten träffar jordytan så kommer därför inledningsvis den uppluckrade yttjorden att deformeras utan nämnvärt motstånd. Vid viktens fortsatta rörelse nedåt kommer sedan den undre mindre störda jorden att utöva ett större motstånd mot fortsatt deformation vilket ger sig till känna som ett deformationshårdnande förlopp med ökande moduler.

En annan förklaring kan vara att en spänningsrelaxation skett i fyllningen. Denna relaxation som inträffat som ett resultat av kryprörelser är som störst i fyllningens överyta eftersom vertikalspänningarna där är som lägst.

Även om faktorn vattenkvot i analysen visat sig utöva ett relativt ringa inflytande på tangentmodulen, så kan det relativt starka samspel som indikeras mellan faktorerna vattenkvot och packningsarbete motivera att de två olika vattenkvoterna analyseras separerade. Detta ger då möjlighet att tydligare klargöra hur detta samspel ser ut. En jämförelse av klassmedelvärdena för den våta respektive torra analysen, tabell 5.31b och 5.32b, visar att detta samspel har sin förklaring i de låga tangentmoduler som erhållits på den yta som våtpackats med 8 vältöverfarter. För såväl våt- som torrpäckad fyllning gäller annars att de högsta modulerna erhållits vid 4 vält-

överfarter. En jämförelse av klassmedelvärdena för faktorn spänningsnivå mellan våt- och torrpackad fyllning visar att i båda fallen erhålles en ökning av tangentmodulen när grundtrycket ökar från 200 till 400 kPa men ökningen är mest påtaglig i den torrpackade fyllningen.

Vid en analys motsvarande ovan men för försöksserien med 0.5 m fallhöjd, tabell 5.33, uppvisas i stort samma influenser som vid 0.2 m fallhöjd men några markanta avvikelser kan konstateras. Den mest iögonfallande skillnaden utgöres av att faktorn vattenkvot vid 0.5 m fallhöjd är kraftigt signifikant medan den vid 0.2 m fallhöjd var nära nog betydelselös. Dessutom har samspillet mellan faktorerna packningsarbete och vattenkvot kraftigt stärkts. En analys med separerade vattenkvoter, tabell 5.34 och 5.35, visar för den våtpackade fyllningen framförallt på ett mycket stort inflytande av packningsarbetet. Klassmedelvärdena avslöjar att tangentmodulen är mycket hög vid de fallviktförsök som utförts på den fyllning som packats med 4 vältöverfarter. Tangentmodulerna som erhållits vid fallviktsförsök i den fyllning som packats med endast 2 överfarter är klart lägre. Lägst är dock modulerna erhållna vid ett packningsarbete motsvarande 8 vältöverfarter. Vad gäller spänningsnivåns inverkan är även den klart signifikant, och genomgående gäller att tangentmodulen växer med ökande spänning. Den torrpackade fyllningen uppvisar något annorlunda egenskaper. Packningsarbetets storlek har en mycket liten inverkan på storleken av de tangentmoduler som uppmätts. Spänningsnivån har däremot en inverkan även för dessa försök men inte på samma enhetliga sätt som för de försök som utförts i våtpackad fyllning. Tangentmodulen växer vid en ökning av spänningen från 200 till 400 kPa men avtar därefter. Detta indikerar att den torrpackade fyllningen har en struktur av kollapsande natur, något som inte kunnat påvisats för den våtpackade fyllningen.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (MPa)
A	4	1.11		A:1	11.3
B	2	6.24	★	A:2	16.5
AB	8	2.72		A:3	13.0
C	1	6.16	★	A:4	15.2
AC	4	1.94		A:5	14.5
BC	2	2.39		B:1	10.6
ABC	8			B:2	17.9
				B:3	13.8
				C:1	12.0
				C:2	16.2
				totalmedelvärde	14.1

Tabell 5.31 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för tangentmodulen (MPa) i torrpäckad fyllning utvärderad ur fallviktsförsök med 0.2 m fallhöjd.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (MPa)
A	4	12.85	★ ★	A:1	14.3
B	2	41.98	★ ★ ★	A:2	10.8
AB	8	3.82		A:3	17.7
C	1	5.82	★	A:4	8.7
AC	4	2.00		A:5	12.3
BC	2	4.47		B:1	13.1
ABC	8			B:2	17.4
				B:3	7.8
				C:1	11.7
				C:2	13.8
				totalmedelvärde 12.8	

Tabell 5.32 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för tangentmodulen (MPa) i våtpackad fyllning utvärderad ur fallviktsförsök med 0.2 m fallhöjd.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (MPa)
A	4	1.79		A:1	14.4
B	2	74.09	★ ★	A:2	13.9
AB	8	19.11		A:3	12.8
C	2	22.99	★ ★	A:4	15.1
AC	8	2.38		A:5	15.8
BC	4	0.14		B:1	11.0
ABC	16	1.39		B:2	21.0
D	1	26.58	★ ★	B:3	11.2
AD	4	5.77		C:1	10.8
BD	2	42.33		C:2	15.5
ABD	8	6.15		C:3	17.0
CD	2	2.26		D:1	16.4
ACD	8	0.42		D:2	12.4
BCD	4	1.36			
ABCD	16				totalmedelvärde 14.4

Tabell 5.33 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för tangentmodulen (MPa) i hela fyllningen utvärderad ur fallviktsförsök med 0.5 m fallhöjd.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (MPa)
A	4	0.52		A:1	13.0
B	2	2.82		A:2	12.1
AB	8	8.20		A:3	13.9
C	2	5.31	★	A:4	11.1
AC	8	1.25		A:5	12.0
BC	4	0.61		B:1	10.4
ABC	16			B:2	14.2
				B:3	12.7
				C:1	9.4
				C:2	14.1
				C:3	13.8
				totalmedelvärde 12.4	

Tabell 5.34 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för tangentmodulen (MPa) i torrpäckad fyllning utvärderad ur fallviktsförsök med 0.5 m fallhöjd.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (MPa)
A	4	7.10	★ ★	A:1	15.9
B	2	116.98	★ ★ ★	A:2	15.8
AB	8	14.05		A:3	11.7
C	2	18.37	★ ★ ★	A:4	19.1
AC	8	1.05		A:5	19.7
BC	4	0.65		B:1	11.6
ABC	16			B:2	28.0
				B:3	9.7
				C:1	12.2
				C:2	16.9
				C:3	20.1
					totalmedelvärde 16.4

Tabell 5.35 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för tangentmodulen (MPa) i våtpackad fyllning utvärderad ur fallviktsförsök med 0.5 m fallhöjd.

5.2.10 Statisk plattbelastning

För utvärderingen av plattbelastningsförsöken användes ett för ändamålet framtaget datorprogram. Programmet beräknade slutsättningen för varje laststeg samt krypningen för varje laststeg i tidsintervallen 2-4, 4-8 och 8-16 min. Dessutom beräknades på grundval av den erhållna slutsättningen för varje laststeg en modul kallad Jakymodul, definierad som

$$M=q \cdot D/2 \cdot s \quad (5.16)$$

där

M =Jakymodulen

q =grundtrycket

D =plattdiametern

s =sättningen

För att få en överskådlig bild av plattans beteende vid olika belastning beräknades i programmet även plattans lutning till storlek och riktning. Lutningens storlek angavs i % av plattdiametern. Lutningsriktningen angavs som en vinkel mellan 0 och 360°. Avsikten var att lätt kunna avgöra om en gång påbörjad lutning kontinuerligt accentuerades under försökets gång, och om i så fall lutningsriktningen bibehölls. Om ett, till djup och utbredning mycket lokalt, svagare parti skulle vara beläget under en viss del av plattan borde detta inledningsvis resultera i en lutning av plattan i riktning mot det svagare partiet. Om det svagare partiet var starkt begränsat i djupled borde en uppbromsning av lutningen äga rum vid ökad belastning, och därmed ökad totaldeformation.

Grundtryck-sättningskurvor

De grundtryck-sättningskurvor som kunde ritas upp, på basis av de för de olika grundtrycken erhållna slutsättningsarna, uppvisar stora skillnader mellan försöken på våt- respektive torrpäckad fyllning, se bilaga K 5. Initiiellt uppvisar kurvorna från försöken på torrpäckad fyllning en relativt låg kompression men vid ökande grundtryck erhålles en allt högre kompressibilitet. Försöken på våtpäckad fyllning visar att den initiiellt har en något högre kompressibilitet än den torrpäckade fyllningen men ökningen i totalsättning med ökat grundtryck är däremot avsevärt lägre än för den torrpäckade fyllningen. Denna skillnad är mycket påtaglig. Statistiskt kan denna skillnad i kurvform behandlas genom en jämförelse av Jakymodulen vid olika grundtryck för försöken på våt- respektive torrpäckad fyllning. Det kan vara värt att påpeka den förhållandevis goda överensstämmelse som råder mellan kurvorna erhållna ur försök med samma förutsättningar.

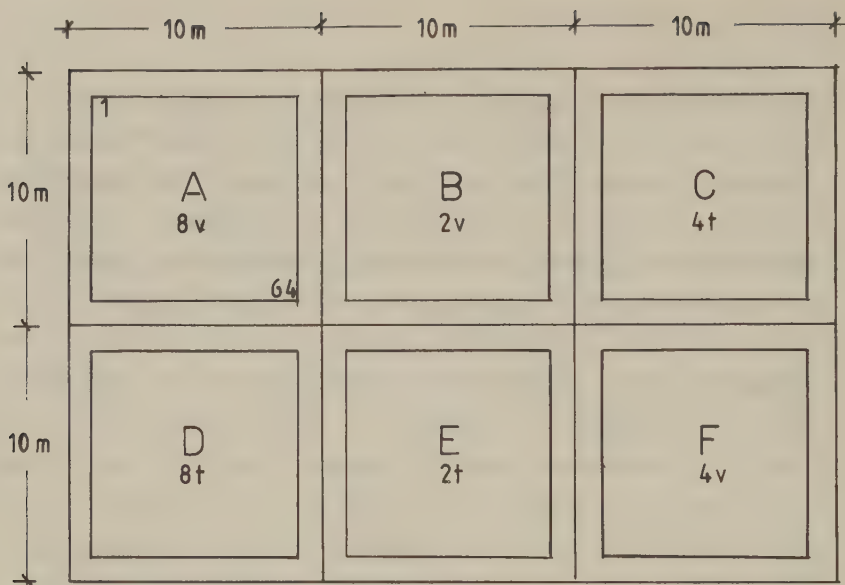


FIG 5.7 Plan över fyllning visande fördelning av packningsarbete och "vattenkvot" samt rutnumrering.

Jakymoduler

Det i ekv (5. 16) ovan angivna sambandet mellan grundtryck och sättning för en statiskt belastad platta är ofta använt för sättningsuppskattningar varför det är befogat med en speciell studie av den i uttrycket ingående modulen. I den utförda variansanalysen av samtliga plattbelastningsförsök förekommer följande faktorer

A=spänningsnivå (100,150,200,250,300 kPa)

B=packningsarbete (2,4 och 8 vältöverfarter)

C=försöksnummer (1 och 2)

D=vattenkvot (vått och torrt)

Varianstabellen (5.36a) visar på en mycket stark inverkan på Jakymodulen från faktorerna spänningsnivå, försöksnummer och vattenkvot. Packningsarbetets inverkan är överraskande svag men ett mycket starkt samspel råder mellan faktorerna packningsarbete och vattenkvot. Spänningsnivåns starka inverkan kan inte sägas vara överraskande vilket dock faktorn försöksnummers inverkan är. En jämförelse av klassmedelvärdena inom faktorn försöksnummer visar att de försök som hamnat i klass C2 alltid uppvisar lägre moduler än de i klass C1. I klass C1 ligger de plattbelastningsförsök som har det lägsta ordningsnumret inom varje fält (A-F), dvs A21,B22,C19,D21,E22 och F22. I klass C2 ligger följaktligen de försök med det högre ordningsnummer inom varje fält. Det kan därför vara på sin plats att erinra om hur numreringen av fält och rutor är gjord, se fig 5.7. Detta innebär att en ruta med ett högt ordningsnummer alltid är belägen närmare fyllningens norra långsida än en ruta med lägre ordningsnummer. Det är således så att Jakymodulen avtar mot fyllningens norra rand, vilket kan förklaras på två sätt som båda har sitt upphov i samma omständighet.

Efter det att matjorden avbanats inom ytan för den blivande fyllningen företogs en avvägning av schakthotten. Denna visar att fyllningsbotten faller drygt 2 % mot nordost. Detta fall kom att i viss mån att bibehållas vid utförandet av fyllningen vilket resulterade i att den färdiga fyllningens yta kom att falla ca 1 % mot nordost. Detta har i sin tur resulterat i att avrinningen på ytan har skett i denna riktning, vilket medfört att fyllningens nordöstra del varit mest exponerad för vatten. Detta kan ha haft som följd att vattenkvoten i denna del av fyllningen ökat sedan fyllningens färdigställande och där orsakat en uppmjukning. En annan möjlig förklaring är den att

schaktbottens lutning ger upphov till krypning i fyllningen och att denna krypning blir störst i den fria kant som ligger lägst eftersom där ej finns någon stödjande jordmassa. Krypningen kan ha medfört att de horisontella spänningarna i fyllningen avsevärt minskat varvid en lägre styvhet vid påförandet av en vertikal belastning erhållits.

Det starka samspelet som påvisats mellan faktorerna packningsarbete och vattenkvot kan inte analyseras med mindre än att en variansanalys utförs med resultaten från våta respektive torra ytor separerade.

Faktorerna i dessa båda analyser utgöres av

A=spänningsnivå (100,150,200 och 300 kPa)

B=packningsarbete (2,4 och 8 vältöverfarter)

C=försöksnummer (1 och 2)

En jämförelse av varianstabellerna (tabell 5.37a och 5.38a) för resultat erhållna i våt- respektive torrpackad fyllning visar att faktorerna spänningsnivå och packningsarbete äger ett mycket starkare inflytande över Jakymodulens storlek i torrpackad fyllning än i våtpackad. Inflytandet är dock odiskutabelt även i den våtpackade fyllningen. En studie av klassmedelvärdena visar att packningsarbetets inflytande är omvänt i de två fallen. I den torrpackade fyllningen resulterar en ökning i packningsarbete i en ökning av Jakymodulen medan motsvarande ökning av packningsarbetet orsakar en minskning av Jakymodulen i den våtpackade fyllningen. Detta är, om den kan sägas gälla generellt, en mycket viktig iakttagelse med stora konsekvenser för designen av packningsarbeten av finkornig jordfyllning. Ur statistisk synpunkt är det dock inte tillåtet att ur stickprov som de aktuella plattförsöken, utförda under ett fåtal variationer av betingelserna, dra generella slutsatser, vilka förutsättes gälla för alla tänkbara nivåer för de ingående faktorerna. Innebörden av detta är att de erhållna resultaten, ej får tolkas som varande allmängiltiga, men kan ses som en indikation på ett förhållande.

Inverkan av faktorn försöksnummer är något starkare i den våtpackade fyllningen än i den torrpäckade. Skillnaden i testkvantiteternas värde är relativt liten men det kan ändå vara motiverat att jämföra klassmedelvärdena erhållna i våt- respektive torrpäckad fyllning.

För de våtpackade fälten är medelvärdena

$$m_1 = 9.89 \text{ MPa}$$

$$m_2 = 7.42 \text{ MPa}$$

och för de torrpäckade

$$m_1 = 7.30 \text{ MPa}$$

$$m_2 = 6.29 \text{ MPa}$$

Först och främst bör konstateras att de högsta Jakymodulerna erhållits i den våtpackade fyllningen. Detta kan vara ett utslag av den tidigare påtalade effekten att värdet på Jakymodulen i fyllningen avtar mot dess norra rand. Två av de tre våtpackade fälten ligger nämligen utmed den södra randen medan två av de tre torrpäckade fälten ligger utmed den norra.

Den andra omständigheten värd att påtalas utgörs av det faktum att m_2 i den våtpackade fyllningen till sin storlek är densamma som m_1 i den torrpäckade fyllningen. Denna likhet är intressant med hänsyn till att 2/3 av de värden, som legat till grund för medelvärdesberäkningarna, i båda fallen är belägna inom fyllningens centrala delar. Det kan med andra ord vara så att skillnaderna i egenskaper mellan våt- respektive torrpäckad fyllning är så små relativt effekten av fältens inbördes placering att dessa skillnader ej framgår vid en jämförelse av medelvärdena på Jakymodulerna. Det tycks dock finnas en odiskutabel skillnad vilken, som tidigare påtalats, utgörs av kurvformen eller annorlunda uttryckt Jakymodulens spänningsberoende. Vid låga värden på grundtrycket (100–150 kPa) är Jakymodulen för torr respektive våtpackade ytor, i medeltal lika stora. Variationer finns beroende på mängden packningsarbete. Med ökande grundtryck uppträder en

allt större skillnad i modul mellan våt- respektive torrpackad fyllning, främst beroende på att modulen i torrpackad fyllning minskar kraftigt. När grundtrycket stigit till 300 kPa har modulen reducerats till ca $1/3$ av värdet vid 100 kPa i den torrpackade fyllningen medan den i den våtpackade fyllningen ännu uppgår till drygt halva värdet.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (MPa)
A	3	86.81	★★★	A:1	11.3
B	2	6.42	★	A:2	8.0
AB	6	0.57		A:3	6.5
C	1	37.10	★★★	A:4	5.1
AC	3	4.34		B:1	8.5
BC	2	22.78		B:2	7.4
ABC	6	1.90		B:3	7.4
D	1	42.63	★★★	C:1	8.6
AD	3	2.14		C:2	6.9
BD	2	172.30		D:1	6.8
ABD	6	6.06		D:2	8.7
CD	1	6.53			
ACD	3	0.93			
BCD	2	4.79			
ABCD	6				
				totalmedelvärde	7.7

Tabell 5.36 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för Jakymodulen (MPa) i hela fyllningen utvärderad ur plattbelastningsförsök.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (MPa)
A	3	118.43	★ ★ ★	A:1	10.8
B	2	122.85	★ ★ ★	A:2	7.3
AB	6	7.18		A:3	5.6
C	1	12.96	★	A:4	3.6
AC	3	1.56		B:1	4.2
BC	2	33.20		B:2	6.7
ABC	6			B:3	9.5
				C:1	7.3
				C:2	6.3
					totalmedelvärde 6.8

Tabell 5.37 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för Jakymodulen (MPa) i torrpäckad fyllning utvärderad ur plattbelastningsförsök.

faktor	frihetsgrader	testkvantitet	signifikans	klass	medelvärde (MPa)
A	3	13.20	★ ★	A:1	11.8
B	2	49.50	★ ★	A:2	8.8
AB	6	1.31		A:3	7.5
C	1	15.48	★ ★	A:4	6.6
AC	3	1.87		B:1	12.8
BC	2	4.79		B:2	8.0
ABC	6			B:3	5.2
				C:1	9.9
				C:2	7.4
totalmedelvärde					8.7

Tabell 5.38 Varians-, a, och klassmedelvärdestabell, b, för Jakymodulen (MPa) i våtpackad fyllning utvärderad ur plattbelastningsförsök.

Kryptryck

De kryptryck som utvärderats enligt den av Hartleⁿ (1974) redovisade metoden återfinnes i tabell 5.39.

Tabell 5.39 Kryptryck utvärderade i tidsintervallet 8-16 min vid plattbelastningsförsök.

försöksnummer	kryptryck (kPa)	medelvärde (kPa)
A: 21	415	
A: 43	425	420
B: 22	615	
B: 44	500	560
C: 19	290	
C: 46	310	300
D: 21	170	
D: 46	200	185
E: 22	115	
E: 44	120	120
F: 22	600	
F: 43	440	520

Plattornas lutning

De högsta värdena på lutningen kan sägas ha inträffat på fält E, vilket är torrpakat med två överfarter. De lägsta värdena på lutningen har erhållits på fält F vilket våtpackats med 4 överfarter. På övriga fält är lutningens storlek i stort densamma.

De initiiellt erhållna lutningsriktningarna har i stort bibehållits under hela belastningsrutinen för samtliga försök.

6 Försökslokal Dubbelknappen

6.1 Allmänt

Lokalen är belägen inom Fosie industriområde i den sydöstra delen av Malmö. Området var ej massbalanserat utan ett under-skott av massor rådde, vilket nödvändiggjorde att massor från olika markarbeten inom Malmö kommun utnyttjades för att täcka behovet. Detta resulterade i en tämligen heterogen massammansättning. De massor som ej var från platsen stackades inom området i väntan på användning. Markarbetena utfördes under sommaren och hösten 1977.

För losstagning och utläggning av såväl naturliga som stackade massor användes schaktvagnar. Efter utläggningen med schaktvagnar bladades massorna ut i ca 0.3 m tjocka skikt mha en bandtraktor. Varje påfört skikt packades med en 3-tons får-fotsvält med ett okontrollerat antal överfarter. Efter avslutad får-fotsvältning packades varje skikt slutligen med en slätvält. Syftet med slätvältningen var att erhålla en jämn och slät yta så att risken för vattensamlingar på fyllningens yta i samband med nederbörd minskade. Först efter avslutad slätvältning påfördes nästa skikt. Den färdiga fyllningens mäktighet kom inom området att variera mellan 0 och 2 m. Inom den mäktigaste delen av fyllningen lades en provyta in för fältförsöken.

6.2 Fältundersökningar

Inom provytan som återges i fig 6.1 utfördes försök med följande kontrollmetoder.

- packningsgradsbestämning med varierande provvolym
- viktsondering, maskinell
- vingsondering, handhållen
- trycksondering med mekanisk kraftregistrering

Dessutom utfördes mätningar av fyllningens egenskättningar och statiska plattbelastningsförsök i halvskala.

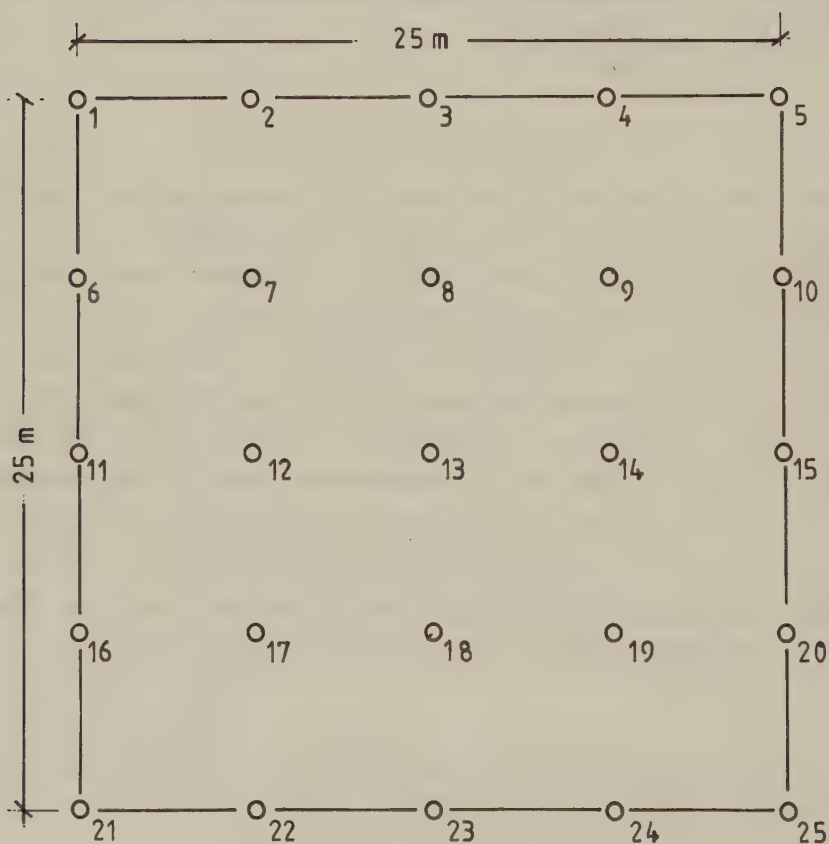


FIG 6.1 Plan över försöksyta, Dubbelknappen.

6.2.1 Densitetsbestämningar

Bestämningar av packningsgraden (eller snarare densiteten) gjordes i punkterna 1,3,5,11,13,15,21, 23 och 25 med två olika vattenvolymetrar 1 gång per skikt. Densitetsbestämningarna utfördes med såväl Statens Vägverks standardvolymer som med en volymer av enkel typ, utvecklad vid avd. för Geoteknik vid LTH. Det som främst skiljde volymetrarna åt var provvolymens storlek. Vid provtagning med standardvolytern erhöles provvolymen mellan 0.5 och 1.0 dm³. Den andra volytern tillät provvolymen mellan 10 och 18 dm³. Avsikten var att klargöra om ett volymberoende fanns, och således om standardmetoden undersökte en tillräckligt stor volym. Det var rimligt att inhomogenitet i fyllningen ger sig till känna som en större spridning i resultaten från standardvolytern jämfört med den större. Praktiskt tillgick försöken så att i en given försökspunkt utfördes alltid först densitetsbestämningen med standardvolytern. När denna var avslutad placerades en metallplåt, med ett cirkulärt hål i, koncentriskt över gropen efter standardvolytern. Denna grop utvidgades i storlek så att den i markplanet erhöles samma diameter som hålet i metallskivan. Urgrävt jordmaterial lades i en medhavd spann och forslades till laboratoriet där materialet vägdes och stickprover uttogs för vattenkvotsbestämning. Volymen bestämdes genom att en plastduk (av tunn kvalitet) lades mot gropens sidor varefter gropen vattenfylldes. Volymen av det vatten som erfordrades för att fylla gropen bestämdes. Genom detta förfarande kom den volym som användes för bestämningen med standardvolymer att utgöra en delvolym av volymen vid bestämningen med den större volytern.

6.2.2 Viktsondering

Viktsondering utfördes i punkterna 1,3,5,11,13,15,21,23 och 25 efter varje skikts slutförande. Viktsondering drevs var gång till ett djup motsvarande 0.5 m under schaktbotten. Att sondering utfördes efter varje skikts färdigställande och till samma nivå var med en speciell avsikt, nämligen att söka klarlägga inverkan på tidigare utlagda skikt, utav påförandet och packningen av efterkommande skikt. Viktsonderingen utfördes med maskinell viktsond, typ Borros.

6.2.3 Vingsondering

Vingsondering utfördes i punkterna 1-25 en gång per skikt. Vingen var av dansk typ, en sk V5-vinge, och var monterad på ett 1 m långt sondstål. Sondstålets övre ände kunde förses med slagnacke vilken användes för att med slägga slå ned vingen till den nivå på vilken bestämningen skulle utföras. När vingen nått avsedd nivå togs slagnacken av och en momentnyckel anbringades mot stålets övre ände. Momentnyckeln var försedd med följevisare vilket möjliggjorde en bestämning av det maximala vridmoment som anbringats för att rotera vingen i jorden.

6.2.4 Trycksondering

Trycksondering utfördes i punkterna 1,3,5,11,13,15, 21, 23 och 25 efter fyllningens färdigställande. Sonderingen avbröts när spetsen nått naturlig jord. Den utrustning som användes var av äldre typ (Nilcon) med manuell neddrivning mha kedjedomkraft, och pyramidspets.

6.2.5 Egensättningar

Mätningar av egensättningarna i den färdiga fyllningen har utförts. Avsikten med dessa mätningar var att utifrån den färdiga fyllningens egensättningar kunna bedöma dess kompressionsegenskaper. Kort efter fyllningens färdigställande installerades därför en speciell typ av sättningspeglar i punkterna 1, 5, 13, 21 och 25. De använda sättningspeglarna bygger på ett förfarande utvecklat vid SGI för mätning av sättningar (alternativt hävningar) hos byggnader. Installationen in situ utgöres av två delar, en rörlig och en fast del.

Den fasta delen utgjordes av ett 1/2" vattenledningsrör vars nedre ände var försedd med en 0.3 m lång jordskruv med diametern 0.05 m. Detta rör fördes ned genom ett i fyllningen förborrat hål och jordskruvsnoden drogs fast ca 0.5 m ned i naturlig jord. För att undvika vidhäftning mellan rör och jord så omgavs röret av ett pvc-rör vilket inom vissa gränser kunde röra sig fritt i förhållande till 1/2" röret. Det inre metallrörets längd avpassades så att det stack upp ca 1 m över fyllningens ovkant. Kring den uppstickande delen av 1/2" röret påfördes ett 1 1/2" rör med en längd av 1.3 m. Detta rör var utvändigt försett med en i höjdlängd justerbar krage, vilken tjänstgjorde som fundament för det yttre röret. Kragen grundlades på 0.3-0.4 m djup i fyllningen och fixerades till röret med ett antal stoppskruvar. I sin övre ände var det yttre röret försett med en speciell infattning i rostfritt stål vilken passade till den mätlocka som användes. Det inre röret försågs i sin övre ände med en knopp i rostfritt stål. Med mätlockans hjälp kunde på detta sätt det yttre rörets rörelser relativt det inre "fasta" röret bestämmas. Upplösningen i sättningsmätningarna var så god som $1 \cdot 10^{-5}$ m.

6.2.6 Statiska plattbelastningsförsök

Statiska plattbelastningsförsök utfördes efter fyllningens färdigställande med 4 olika plattstorlekar. Samtliga plattor var cirkulära och diametrarna var 0.083, 0.150, 0.280 och 0.600 m. Avsikten var att två försök med varje plattstorlek skulle utföras. Den använda försöksutrustningen överbelastades dock under det första av de två stora plattförsöken, varför försöksserien då fick avbrytas. Detta innebar att försöksserien kom att omfatta två försök av vardera de tre minsta plattorna samt ett avbrutet försök med den största plattan. Försöksutrustningen utgjordes av plattor i stål vilka belastades mha en hydraulisk handpumpad domkraft. Som mothåll för domkraften användes en fackverksbalk med 1.5 m spännvidd. Balken var via dragstänger fastgjord till fyra parvis ihopmonterade stålbalkar. Balkarna var fastgjorda i marken med jordskruvar, se fig 6.2. Kraften mättes med en elektrisk kraftsensor och registrerades på en X-Tid skrivare. Plattans deformation mättes med 2 stycken mätklockor samt en elektrisk deformationssensor av skjutpotentiometertyp. Belastningen av plattorna skedde stegvis med ett belastningssteg som varierade mellan 50 och 200 kPa för de olika plattstorlekarna. Tiden som varje laststeg fick verka varierade mellan 32 och 64 min.

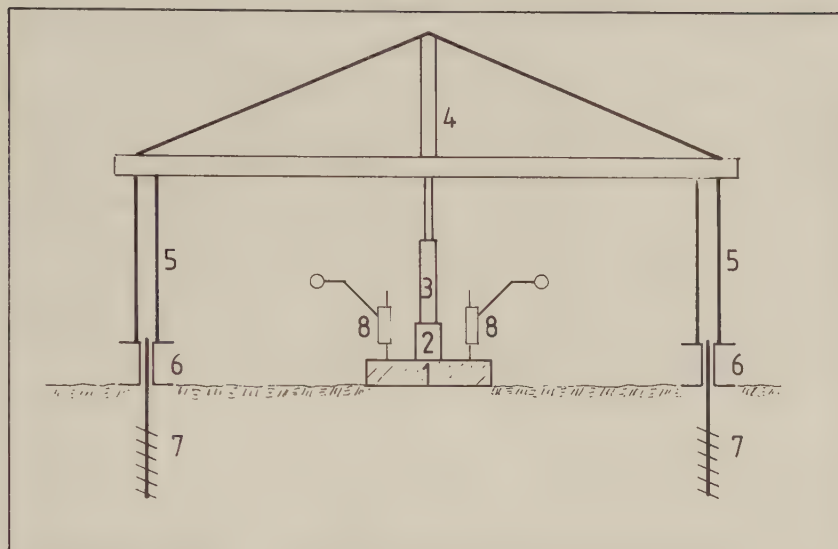


FIG 6.2 Försöksutrustning vid plattbelastning.

- 1 platta
- 2 kraftsensor
- 3 hydraulisk domkraft
- 4 fackverksbalk
- 5 dragstag
- 6 UNP-balkar
- 7 jordskruvar
- 8 deformationssensorer

6.3 Laboratorieförsök

Det jordmaterial som togs in till laboratoriet i samband med densitetsbestämningarna användes dessutom till ett omfattande försöksprogram i laboratoriet. Förutom att materialets korn- och packningskurvor bestämdes, genomfördes ett försöksprogram i avsikt att klargöra vattenkvotens och packningsgradens inverkan på hållfasthets- och kompressionsegenskaper. De försökstyper som utfördes var enaxiella tryckförsök, standard triaxialförsök samt ödometerförsök av deformationsstyrd typ.

6.3.1 Hållfasthet

Den odränerade hållfastheten bestämdes vid varierande vattenkvot och packningsgrad, i 10 punkter (fig 6.3), genom enaxiella tryckförsök. För att öka säkerheten i bestämningarna utfördes dubbla försök i varje punkt vilket innebar totalt 20 stycken enaxiella tryckförsök. Provkropparna packades in i en delbar mässingscylinder. Den på förhand, mot aktuell torrden-sitet svarande, uträknade provmängden delades i 4 lika stora delar. En delmängd i taget placerades i cylindern varefter den packades till en fjärdedels provvolym mha en instampningsstav. Efter att hela provkroppen packats in lösgjordes cylindern från provkroppen. De erhållna provkropparnas storlek var $H \cdot D = 0.1 \cdot 0.05 \text{ m}^2$. Tryckningen av provkropparna ägde rum i en enaxiell tryckapparat typ Geonor.

Den dränerade hållfastheten bestämdes på provkroppar med samma storlek och tillverkade på samma sätt som vid de enaxiella tryckförsöken. Försöken utfördes "dioddränerade" dvs de tilläts att avge men ej att ta upp vatten. Tre försök utfördes vid respektive packningsgrad och vattenkvot. Celltrycket för de tre försöken var 100, 200 och 400 kPa. Provkropparna tilläts konsolidera ca 12 h varefter skjuvningen skedde med en deformationshastighet av 0.002 m/h. Denna hastighet ansågs tillräckligt låg för att säkerställa förhindrandet av porvattenövertryck i provkroppen. Vid jämförelse mellan resultat er-

hållna med denna deformationshastighet och resultat erhållna vid hälften så hög deformationshastighet erhöles inga signifikanta skillnader. Försöken avbröts först efter att minst 15 % axiell deformation utbildats. Ur triaxialförsöken utvärderades kohesionen och friktionsvinkeln, vid varje hel procents deformation, enligt Mohr-Coulomb. Genom att använda den av Janbu (1970) föreslagna utvärderingsmetoden, var det möjligt att använda linjär regression vid anpassning av "brottlinjen" till de erhållna försöksvärdena.

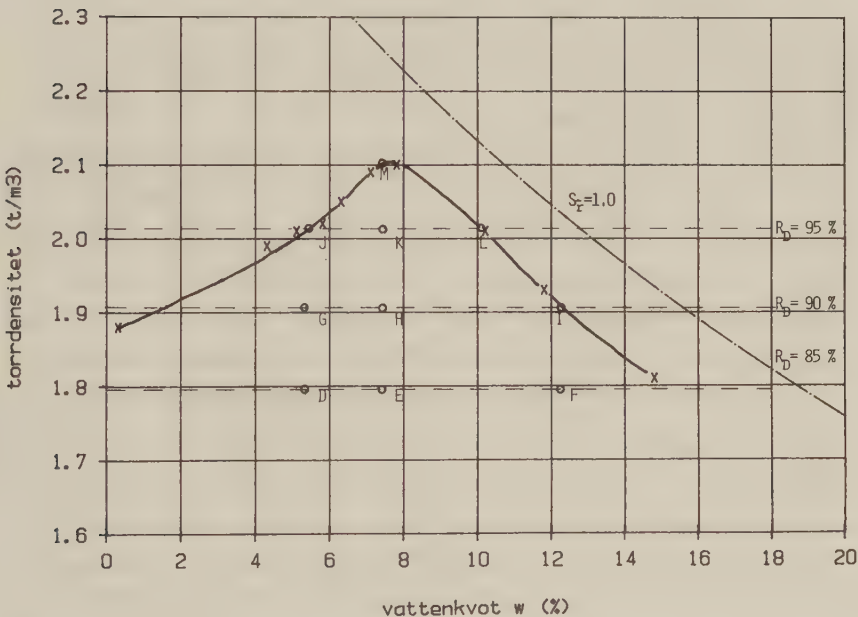


FIG 6.3 Packningskurva med inlagda försökspunkter avseende enaxiella tryckförsök.

Vid en senare tidpunkt utfördes ytterligare en serie triaxialförsök, vilken väsentligen skiljde sig från den föregående. Avsikten med den nya försöksserien var att studera huruvida spänningsvägen till brott hade någon avgörande inverkan på storleken av hållfasthetsparametrarna vid dränerade förhållanden. Detta gjordes genom att utföra standard, aktiva

och passiva triaxialförsök. Parallella försök utfördes vid tre olika packningsgrader och vattenkvoter, se tabell 6.1.

Tabell 6.1 Vattenkvoter och packningsgrader vid vilka standard, aktiva och passiva triaxialförsök utförts.

vattenkvot (%)	packningsgrad (%)		
	90	95	100
4.7	x	x	
7.7			x
10.7	x	x	

Försöksserien inleddes med att standardtriaxialförsöken utfördes. Tre försök med varierande celltryck utfördes i varje försökspunkt. Celltrycken valdes till 25, 75 och 150 kPa. Avsikten var sedan att som startvärden på huvudspänningarna vid de aktiva försöken, välja den största huvudspänningens brottvärde från respektive standardförsök. Detta visade sig dock inte möjligt, då den för de aktiva försöken använda utrustningen begränsade det möjliga celltrycket till ca 1000 kPa. Istället valdes att, som startvärden i de aktiva försöken, använda 65 % av största huvudspänningens värde vid brott för respektive celltryck, vid standardförsöken. Förutom spänningsvägen finns det en betydande skillnad i utförandet mellan standardförsöken och de båda andra försökstyperna. Vid utförandet av standardförsöken tvångsdeformeras provkroppen axiellt. Vid de två andra försökstyperna utbildas deformationerna "fritt" under inverkan av en axiell och en radiell spänning.

6.3.2 Kompressibilitet

Ödometerförsök utfördes i samma 10 punkter som de enaxiella försöken i avsikt att klargöra vattenkvotens och packningsgradens inverkan på kompressibiliteten. Provkropparna tillverkades på samma sätt som vid de enaxiella och triaxiella

försöken men med den skillnaden att provet packades in direkt i ödometerringen. Provstorleken var $H \cdot D = 0.03 \cdot 0.075 \text{ m}^2$. Ödometern var av typ CRS men försöksrutinen skiljde sig från den som gäller vid CRS-försök. Vid CRS-försök deformeras provet med en konstant hastighet medan deformationshastigheten vid dessa försök styrdes av uppkomna portryck. Detta var möjligt tack vare att en steglös elektrisk växellåda anslutits till motorn som drev pressen. Med denna växellåda var det möjligt att steglöst variera hastigheten i intervallet 0.1-1.0 gånger det nominella värde som ställdes in med den mekaniska växellåda som är standard för utrustningen. En utrustning utvecklades där den elektriska växellådan kunde styras med hjälp av elektrisk signal. Deformationshastigheten kunde styras antingen av ett förhållande mellan effektivspänning och portryck eller av ett absolut värde på portrycket. Genom att ex vis ställa in 30 kPa absolut portryck erhöles en reduktion av den nominellt inställda hastigheten med 50 % vid ett aktuellt portryck lika med 30 kPa. Vid högre portryck blev hastighetsreduktionen större och för lägre portryck blev reduktionen lägre än 50 %. Enligt vilket matematiskt samband som hastighetsreduktionen skulle ske angavs genom inställning av lutningskoefficienten för den räta linjen

$$v_n = v_n \cdot (0.5 + k_n \cdot (u - u_n)) \quad (6.1)$$

där

v = aktuell deformationshastighet

v_n = nominell deformationshastighet

k_n = lutningskoefficient

u = aktuellt portryck

u_n = nominellt portryck

Avsikten var att med denna utrustning reglera deformationshastigheten så att portrycket aldrig blev större än ett visst värde, antingen i absoluta tal eller relativt effektivspänningen. Utrustningen försågs dessutom med ett antal elektriskt styrda reläer vilket möjliggjorde automatisk på- och avlastning av jordprovet vid förinställda spänningsnivåer.

6.4 Resultat

6.4.1 Densitetsbestämningar

Resultaten från densitetsbestämningarna med de två olika vattenvolymetrarna är sammanställda i tabell 6.2. Det mest iögonfallande är de med standardvolymetern ställvis uppmätta mycket låga densiteterna. Så låga värden på torrdensiteten som 1.35 t/m^3 har uppmätts vilket motsvarar en packningsgrad $R_D = 64 \%$. Å andra sidan har med standardvolymetern även uppmätts torrdensiteter som motsvarar $R_D = 122 \%$. Anmärkningsvärt nog är dessa båda extremvärden erhållna i ett och samma skikt, det tredje. Detta skikt visar sig även vara det skikt där de lägsta vattenkvoterna uppmätts, i medeltal $w = 7.5 \%$. Den låga vattenkvoten i detta skikt är troligen orsaken till den därstädes stora variationen i uppmätt torrdensitet. Den använda välten har förmodligen ej förmått slå sönder de (pga den låga vattenkvoten) fasta jordklumparna. Därav har skikt tre erhållit en mycket inhomogen struktur, bestående av mycket fasta större jordklumpar omgivna av i sig fasta men mycket löst lagrade mindre jordklumpar. Under packningsarbetet har således välten "ridit" på de större klumparna och den omgivande jordmassan har överhuvudtaget ej utsatts för något större packningsarbete, utan snarare skakats omkring av vibrationerna (vertikala accelerationer) med en lös lagring som följd.

I tre av de fem skikten har störst torrdensitet uppmätts med den stora volymetern. Det är endast i skikten tre och fyra som standardvolymetern gett högre värden. Att det är just i dessa skikt som standardvolymetern ger högre värden än den stora volymetern styrker antagandet om att skikt tre består av fasta klumpar omgivna av en löst lagrad jordmassa.

Tabell 6.2 Sammanställning av reultat erhållna vid densitetsbestämningar med Vägverkets standardvolymer, och en stor special volymeter.

STANDARD										
Punkt nr										
Skikt	1	3	5	11	13	15	21	23	25	Medel-st av
1 ρ_d	1,71	1,72	2,03	1,94	1,83	1,80	2,03	1,92	1,37	1,82 $\pm$ 0,21
w	7,2	10,3	8,5	7,9	9,3	8,5	9,5	9,6	8,6	8,82 $\pm$ 0,95
2 ρ_d	1,67	1,58	1,77	1,51	1,48	1,67	1,64	1,92	1,84	1,68 $\pm$ 0,15
w	12,3	10,9	9,2	11,9	11,9	12,8	11,3	10,5	10,3	11,23 $\pm$ 1,13
3 ρ_d	1,55	1,87	1,35	2,31	2,58	1,70	1,70	1,48	2,19	1,86 $\pm$ 0,42
w	7,0	5,9	9,4	9,0	8,9	9,2	6,9	6,7	5,9	7,54 $\pm$ 1,35
4 ρ_d	1,68	1,87 ^x	1,93 ^x	2,03 ^x	1,99 ^x	1,91	1,92	2,08	1,93	
w	10,3	9,2	10,3	12,4	15,0	14,4	11,0	10,8	11,5	
4 ρ_d	1,74	1,45	1,73	1,80	1,76	1,68	1,67	1,70	1,74	1,70 $\pm$ 0,10
w	12,5	13,1	11,2	13,0	13,2	13,5	10,8	11,3 ^o	11,6	12,2 $\pm$ 0,02

^x osäkra värden p g a förväxling

^o skattad vattenkvot

STOR										
Punkt nr										
Skikt	1	3	5	11	13	15	21	23	25	Medel-st av
1 ρ_d	1,82	1,94	1,98	1,90	2,00	1,90	1,93	1,85	2,07	1,93 $\pm$ 0,08
w	9,2	9,9	8,3	8,8	10,1	9,7	9,4	10,2	10,2	9,53 $\pm$ 0,67
2 ρ_d	2,20	1,80	1,77	1,90	1,93	1,99	1,93	1,97	1,94	1,94 $\pm$ 0,12
w	9,4	9,9	9,3	9,6	11,3	13,0	12,0	11,2	8,9	10,51 $\pm$ 1,41
3 ρ_d	1,67	1,63	1,62	1,63	1,59	1,74	1,82	1,79	1,69	1,69 $\pm$ 0,08
w	9,9	9,6	9,9	9,8	9,6	10,0	8,6	8,4	9,1	9,43 $\pm$ 0,59
4 ρ_d	1,54	1,89 ^x	1,67 ^x	1,81 ^x	1,75 ^x	1,86	1,59	1,90	1,84	
w	8,2	10,1	10,5	14,2	13,9	14,7	11,4	12,8	11,4	
5 ρ_d	1,87	1,72	1,77	1,82	1,79	1,83	1,79	2,08	1,94	1,85 $\pm$ 0,11
w	11,8	12,3	10,2	12,8	11,8	12,6	11,0	10,5	10,8	11,5 $\pm$ 0,94

^x osäkra värden p g a förväxling

Det är rimligt att anta att de fasta jordklumparna har en volym mellan 1 och 2 dm³. Detta innebär i extremfallet att en densitetsbestämning med standardvolymetern, vars provvolym varierar mellan 0.5 och 1 dm³, kan ske helt i en fast klump. Om den totala jordmassan kan anses utgöras av X andelar fasta klumpar och 1-X andelar löst lagrade mindre klumpar, så erhålles med den stora volymetern en torrdensitet

$$D = X \cdot \rho_f + (1-X) \cdot \rho_l \quad (6.2)$$

där

D=torrdensitet enligt stor volymeter

ρ_f =torrdensitet enligt liten volymeter i en fast klump

ρ_l =torrdensitet enligt liten volymeter i löst lagrade små klumpar

X=andel fasta klumpar

Det är inte orimligt att anta att den som utfört densitetsbestämningarna i fält, i sin strävan efter att ha en plan och väldefinierad yta att ställa volymetern på, omedvetet valt att oftare placera volymetern på fasta större klumpar än på ytan av den lösare omgivande jordmassan. Om man antar att volymetern i tre fall av fem placerats på de fasta klumparna så erhålles som medelvärde från bestämningarna med standardvolymetern, torrdensiteten

$$d = (3 \cdot \rho_f + 2 \cdot \rho_l) / 5 \quad (6.3)$$

För att dessa båda uttryck skall ge samma värde på torrdensiteten krävs således att X=0.6. För lägre värden på X än 0.6 så fås med gjorda antaganden större medeldensitet med standardvolymetern än med den stora. I verkligheten torde X ligga i intervallet 0.05 till 0.3. Detta skulle kunna förklara de högre värdena som erhållits med standardvolymetern i skikt tre.

6.4.2 Viktsondering

Avsikten med att utföra viktsonderingar ned till fyllningsbotten efter varje skikts färdigställande var att studera inverkan på djupare belägna skikts fasthet av packningsarbetet på just färdigställt skikt. Detta har i tabell 6.3 gjorts genom att sonderingsmotståndet på 0.2 till 0.4 m djup i det första skiktet studerats efter varje skikts påförande.

Tabell 6.3 Utveckling av viktsonderingsmotståndet (hv/0.2 m) i det först utlagda skiktet (skikt 1), efter utläggning och packning av följande skikt (2 till 5).

hål nr	skikt nr				
	1	2	3	4	5
1	22	3	4	5	4
3	14	7	8	12	20
5	10	4	6	17	18
11	7	23	8	11	19
13	4	5	6	8	12
15	3	11	10	18	56
21	11	3	2	6	21
23	5	8	8	20	12
25	4	13	5	5	19

En viss ökning av sonderingsmotståndet i understa skiktet kan påvisas först efter fjärde och femte skiktens påförande. Det är däremot svårt att avgöra om denna ökning i sonderingsmotstånd beror av det ökande överlagringstrycket, eller om det är

en effekt av ökat packningsarbete. Studeras fasthetsutvecklingen i en och samma punkt efter de olika skiktens påförande erhålles en mycket splittrad bild, beroende av den stora spridning som erhållits i resultaten. I vissa av punkterna registreras initiiellt en negativ fasthetsutveckling, i andra hoppar sonderingsmotståndet upp och ner. I någon eller några punkter kan skönjas en entydig ökning. Efter det att det tredje skiktet lagts ut och packats erhålles ett i medeltal lägre sonderingsmotstånd, jämfört med vad som erhöles efter såväl det första som det andra skiktet. Det lägre värdet kan sägas helt bero av att de lokalt höga motstånd som erhöles efter första och andra skiktets påförande saknas efter tredje skiktets påförande. Det är således inte så att sonderingsmotstånden i allmänhet sjunkit vilket man skulle kunna förledas att tro. De enstaka mycket höga sonderingsmotstånden kan bero på att sondering skett genom en fast jordklump eller att mindre stenar legat i sondspetsens väg. För att rätt tolka resultaten borde därför dessa extremvärden på sonderingsmotståndet identifieras och uteslutas ur jämförelserna. Detta görs dock inte här men exempel på sådan "manipulation" av mätvärdena visas för försökslokalen Oxie. Av tabellen framgår även att variationen mellan de olika punkterna är mycket stor. De avslutande sonderingarna i respektive punkt vilka företogs efter fyllningens färdigställande visar på stora variationer i sonderingsmotstånd även mellan de olika skikten, vilket framgår av tabell 6.4.

Tabell 6.4 Sammanställning av erhållna viktson-
deringsmotstånd (hv/0.2 m) i den färdiga fyll-
ningen.

Skikt				Hål nr						medel	std
nr	1	3	5	11	13	15	21	23	25	värde	avv
1	22	14	10	7	4	3	11	5	4	8.9	6.2
2	3	7	4	23	4	10	5	8	11	8.3	6.2
3	4	7	6	9	6	10	2	8	5	6.3	2.5
4	5	12	17	11	8	19	6	19	5	11.3	5.8
5	4	20	18	19	12	48	21	12	19	19.2	12.1
medel											
värde	7.6	12.0	11.0	13.8	6.8	18.0	9.0	10.4	8.8		
std											
avv	8.1	5.4	6.3	6.9	3.4	17.7	7.5	5.4	6.3		

6.4.3 Vingsondering

Fastheten mätt med vingsond varierar mellan 20 och 200. Variationen med djupet uppvisar likheter med motsvarande variation för övriga sonderingsmetoder. Upplösningen i djupled vid vingsondering är dock ännu sämre än vid viktsondering vilket försämrar möjligheterna till jämförelser. En annan icke oväsentlig skillnad mellan å ena sidan vingsonderingen och å andra sidan vikt- respektive trycksonderingarna finns i försöksutförandet. Vingsonderingen utfördes skikt för skikt så att ett värde erhöles per skikt och punkt efter respektive skikts färdigställande. Detta medför att överlagringstrycket varit lika stort vid samtliga försök. Exempel på erhållna vingsondsvärden ges i fig 6.4.

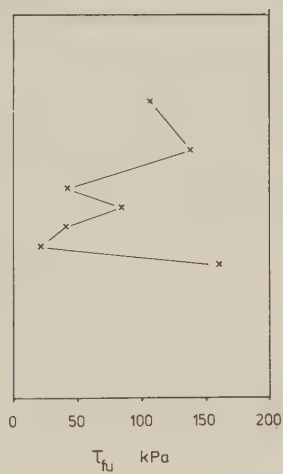
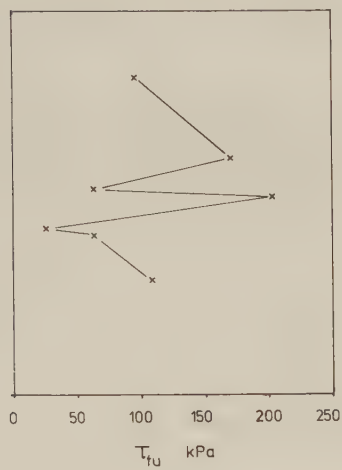


FIG 6.4 Exempel på resultat av vingsonderingar.

6.4.4 Trycksondering

Vid redovisningen av resultaten av trycksonderingarna har valts ett icke sällan använt redovisningssätt vilket innebär att en elasticitetsmodul beräknas ur sambandet

$$E = X \cdot q_c \quad (6.4)$$

där

E = elasticitetsmodulen

q_c = spetstrycket

X = dimensionslös faktor

Värdet på faktorn X varierar starkt i litteraturen. De flesta angivna värdena på X hänför sig till försök med sand. Vid redovisningen i fig 6.5 har valts $X=2$. Den modul som erhållits på detta sätt varierar med djupet mellan 1 och 5 MPa. Trycksonderingsdiagrammen uppvisar ett klart släktskap med viktsonderingsdiagrammen om man betänker skillnaden i registreringsprincip mellan metoderna.

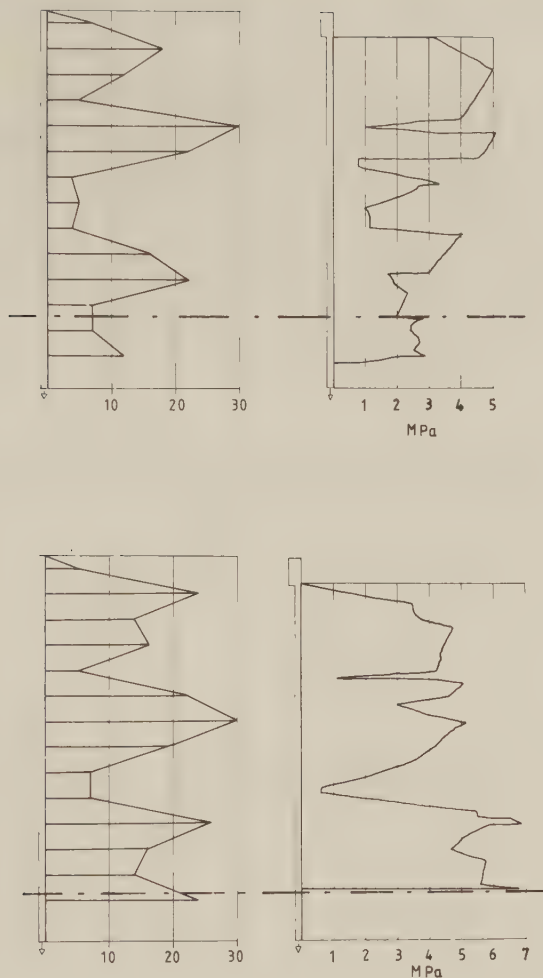


FIG 6.5 Resultat av trycksondering i punkt redovisade som en elasticitetsmodul, $E=2 \cdot q_c$. Den punktstreckade linjen visar övergången till naturlig jord.

6.4.5 Egensättningar

Mätningarna som pågick i ett och ett halvt år visar att sättningarna i huvudsak är avslutade efter 9 till 12 månader och uppgår då till 0.2 till 0.3 % av fyllningens mäktighet, fig 6.6.

En bestämning av kompressionsmodulens storlek på basis av erhållna egensättningar kan göras ur uttrycket

$$M = \sigma_{\text{med}}^* \frac{H}{s} \quad (6.5)$$

Med en fyllningsmäktighet av ca 2 m och en densitet $\rho = 2.16 \text{ t/m}^3$ blir $\sigma^* = 21.2 \text{ kPa}$, varför

$$M = 21.2 / 0.003 = 7.1 \text{ MPa}$$

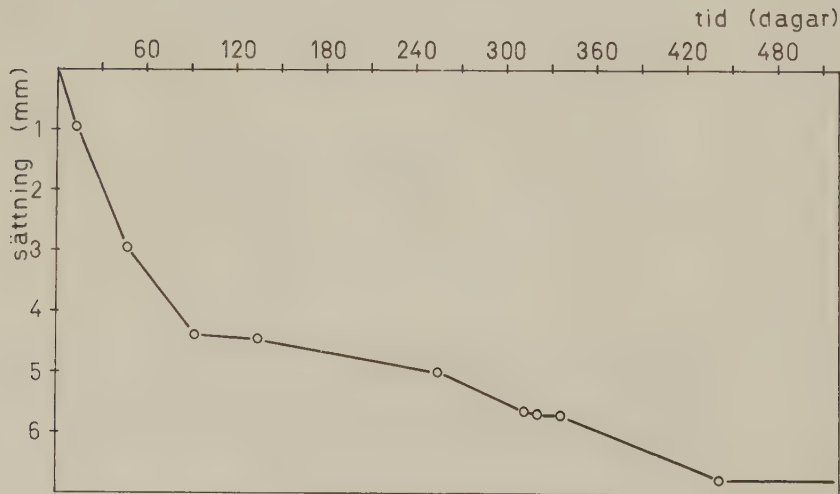


FIG 6.6 Egensättningar som funktion av tiden.

6.4.6 Statiska plattbelastningsförsök

De statiska plattbelastningsförsöken redovisas i diagramform där sättningen dividerad med halva plattdiametern avsatts mot grundtrycket. Detta redovisningssätt har valts för att skapa en "normering" mellan försöken utförda med olika stora plattor. Det ligger därvid nära till hands att utnyttja Jaky's samband

$$s=q \cdot D / (2 \cdot M) \quad (6.6)$$

vilket kan skrivas

$$M=q \cdot D / (2 \cdot s) \quad (6.7)$$

eller

$$M=q / (s / (D/2)) \quad (6.8)$$

Genom detta redovisningssätt kan modulen enkelt avläsas ur diagrammet och försöken med olika plattstorlekar jämföras sinsemellan.

Av fig 6.7 framgår klart ett betydande volymsberoende hos plattbärigheten. Kurvornas form omöjliggör dock utvärderingen av ett gränsvärde på bärigheten. Tyvärr ger en utvärdering av kryptrycket inte mycket ytterligare information. En utvärdering av kryptrycket i tidsintervallet 2-16 min ger resultat enligt tabell 6.5. Vad beträffar det stora volymsberoendet är det författarens uppfattning att det till stor del beror av den "torrskorpa" som utbildas på fyllningens topp. Om man förutsätter att den vid plattförsöken influerade jordvolymen når ned till ett djup under plattan som är lika med dubbla plattdiametern så kommer influensdjupet att variera mellan 0.17 och 1.2 m. De små plattorna ($D=0.083-0.15$ m) kommer därför att ha ett influensdjup som endast till en begränsad del når ned under "torrskorpebildningen". Om denna förklaring av volymsberoendet är riktig så bör det starka volymsberoendet

endast föreligga i ett begränsat volymsintervall. Då den använda belastningsutrustningen havererade i samband med det första av de två belastningsförsöken med 0.6 m diameters platta så kan denna tes ej konfirmeras.

Tabell 6.5 Kryptryckets storlek utvärderad ur plattbelastningsförsök med olika plattstorlekar.

försöks- nummer	plattdiameter (m)	kryptryck (kPa)
1	0.28	100
2	0.28	50
3	0.083	550
4	0.083	2000
5	0.15	1200
6	0.15	400

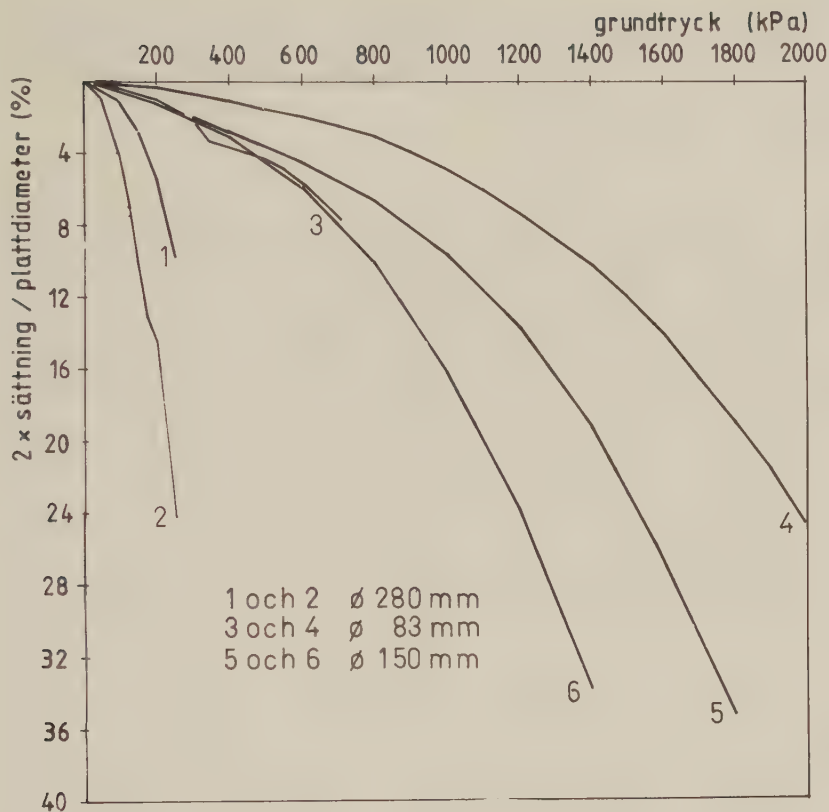


FIG 6.7 Samband mellan spänning och deformation vid plattbelastning med varierande plattstorlekar.

6.4.7 Hållfasthet

Odränerad hållfasthet

Den odränerade hållfastheten, bestämd genom enaxiella tryckförsök på laboratoriepackade prover, visade sig bero av såväl torrdensitet som vattenkvot. Resultaten av samtliga försök framgår av tabell 6.6. Av tabellen framgår att vid packningsgraden 85 % så erhålles den högsta odränerade skjuvhållfastheten vid en vattenkvot nära den optimala. Den lägsta skjuvhållfastheten erhålles samtidigt på våta sidan. Vid såväl 90 som 95 % packningsgrad är den odränerade skjuvhållfastheten i stort densamma vid optimal vattenkvot som på torra sidan. På den våta sidan är den däremot en faktor 3-4 ggr lägre.

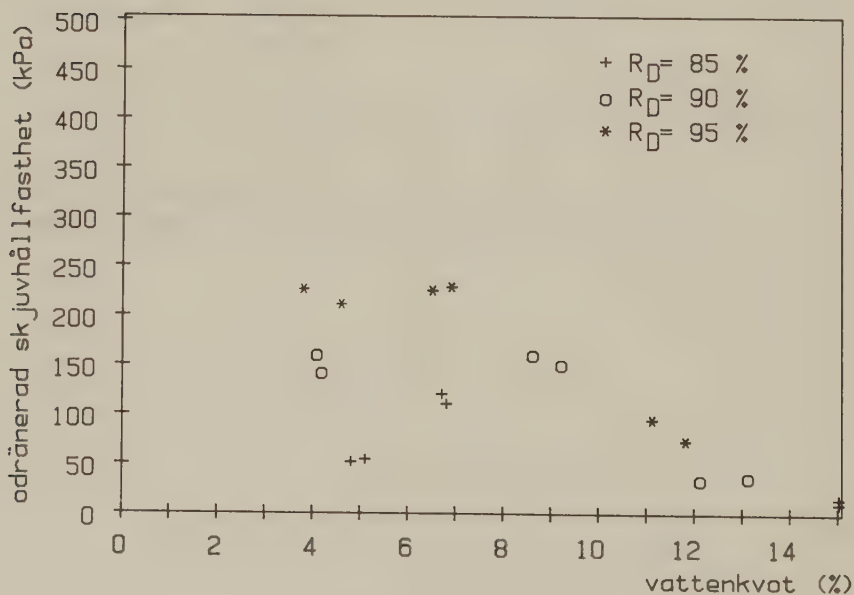


FIG 6.8 Odränerad skjuvhållfasthet enligt enaxiellt tryckförsök, som funktion av vattenkvot och packningsgrad.

Tabell 6.6 Odränerad skjuvhållfasthet (kPa), vid olika vattenkvot och torrdensitet, bestämd genom enaxiella tryckförsök på laboratorieinpackade provkroppar.

PKT	ρ_d t/m ³	w %	R_D %	e	S_r	τ_{fu} kPa	E MPa
D1	1,79	5,1	85,1	0,508	0,270	54,5	5,45
D2	1,79	4,8	85,1	0,508	0,254	52,0	5,20
E2	1,79	6,8	85,1	0,508	0,360	110,8	11,08
E3	1,79	6,7	85,1	0,508	0,355	120,7	12,07
F1	1,79	15,1	85,1	0,508	0,799	15,8	0,40
F2	1,79	15,1	85,1	0,508	0,799	10,8	0,27
H1	1,89	8,6	89,8	0,429	0,539	162,5	16,25
H2	1,89	9,2	89,8	0,429	0,577	152,7	15,27
I1	1,89	13,1	89,8	0,429	0,822	39,5	0,99
I2	1,89	12,1	89,8	0,429	0,803	36,8	0,61
K1	2,00	6,5	95,1	0,350	0,499	225,4	11,27
K2	2,00	6,9	95,1	0,350	0,529	229,0	22,90
L1	2,00	11,8	95,1	0,350	0,906	73,6	2,45
L2	2,00	11,1	95,1	0,350	0,852	95,0	4,75
G1	1,89	4,1	89,8	0,429	0,257	161,9	15,82
G2	1,89	4,2	89,8	0,429	0,263	143,7	20,73
J1	2,00	3,8	95,1	0,350	0,292	226,2	24,85
J2	2,00	4,6	95,1	0,350	0,353	211,0	13,37
M1	2,10	7,1	99,8	0,280	0,667	328,7	22,83
M2	2,10	6,6	99,8	0,280	0,620	346,2	24,78

Dränerad hållfasthet

Allmänt

Den dränerade skjuvhållfastheten har såsom tidigare omnämnts bestämts vid två olika försöksserier. Den första försökserien omfattar uteslutande standard-triaxialförsök, medan den andra omfattar såväl standard som aktiva och passiva triaxialförsök. Då syftet med de två försöksserierna inte varit detsamma finns det skäl att redovisa dem var för sig.

Standard triaxialförsök

Vid triaxialförsök på lerjordsprover vilka laboratoriepackats vid en vattenkvot som väsentligt (>3%) överstiger den optimala så erhålles ofta ej något maximalt värde på den mobiliserbara skjuvspänningen (peakvärde saknas på sigma-epsilon kurvan). Om detta inträffar väljes vanligen värdet på skjuvspänningen vid 10 eller 15 % axiell deformation som skjuvhållfastheten. Korrektheten i detta kan diskuteras varför författaren valt att redovisa såväl kohesionens som friktionsvinkelns utveckling med den axiella deformationen. Detta har gjorts genom att mha linjär regression anpassa en "brottlinje" till korresponderande värden på största och minsta huvudspänningen vid olika värden på den axiella deformationen. För detta har utnyttjats det välkända sambandet

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 (45 + \phi/2) + 2c \tan (45 + \phi/2) \quad (6.9)$$

Genom att sätta σ_3 lika med noll i sambandet ovan så kan kohesionen beräknas ur sambandet

$$c = \sigma_1 / (2 \tan (45 + \phi/2)) \quad (6.10)$$

om ϕ dessförinnan bestämts ur villkoret att linjens lutning i $\sigma_1 - \sigma_3$ diagrammet är lika med

$$\tan^2 (45 + \phi / 2) \quad (6.11)$$

Denna utvärdering av kohesion och friktionsvinkel har gjorts vid varje halvprocents deformation i intervallet 0.5 till 15 %. Resultatet av denna utvärdering visas i fig 6.9a och b för två material med samma packningsgrad 90 % men inpackade vid olika vattenkvot, 4.4 % respektive 12.4 %. Jämfört med optimal vattenkvot ($w_{opt}=7.7$ %) så ligger det ena provet klart på torra sidan och det andra provet lika klart på den våta.

Såsom framgår av fig 6.9 är "kohesionen" densamma vid de två vattenkvoterna då den axiella deformationen överstiger 5 %. Vid lägre värden på den axiella deformationen är skillnaden betydande. För materialet på torra sidan är "kohesionen" störst vid liten deformation och avtar sedan kontinuerligt upp till ca 5 % deformation. Det våtpackade materialet uppvisar ett beroende som är raka motsatsen. "Kohesionen" är liten vid liten deformation för att sedan öka med ökad deformation upp till ca 10 %.

De initiiellt mycket höga värdena på "kohesionen" för det torra materialet kan mycket väl vara skenbara och vara en effekt av kapillära spänningar, vilka kan förmodas existera i det icke vattenmättade materialet ($S_r=0.31$).

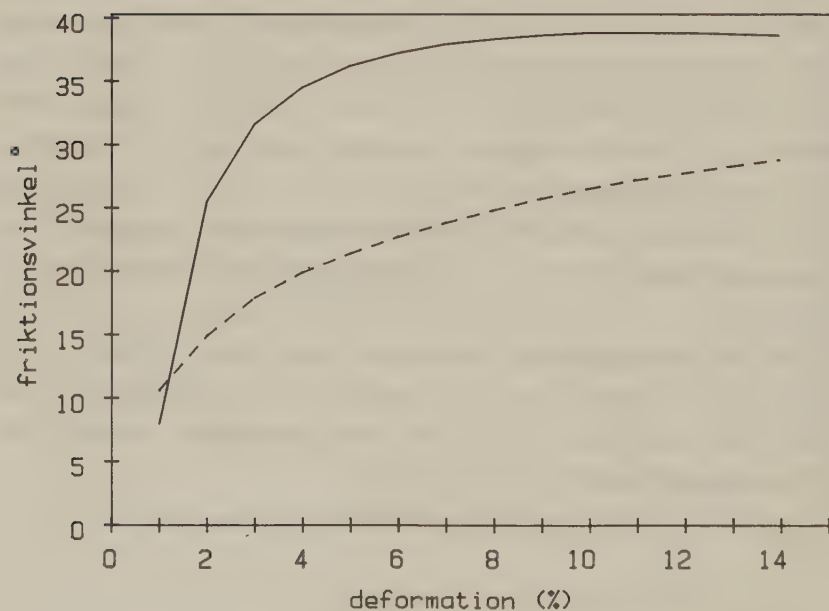
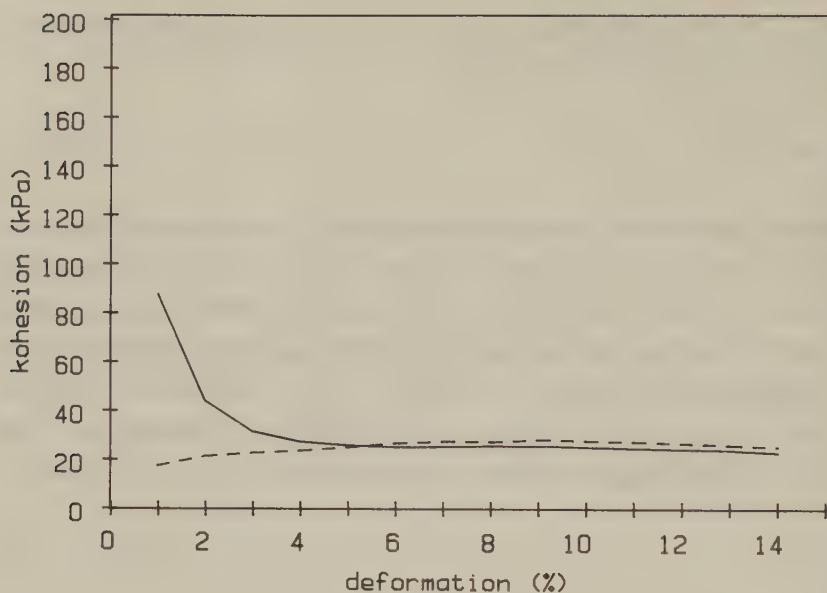


FIG 6.9 Kohesionens och friktionsvinkelns utveckling med deformationen för material inpackat till 90 % packningsgrad (tung lab stampning) vid torr- respektive våtpackning, ($w_{opt} = 7.7\%$).
 — $w = 4.4\%$, - - - $w_{opt} = 12.4\%$

Även vad avser friktionsvinkelns utveckling kan utläsas betydande olikhet mellan våt- respektive torrpackat material. I det torrpackade materialet mobiliseras friktionsvinkeln snabbt och är fullt utvecklad vid 10 % deformation. I det våtpackade materialet är friktionsvinkeln ej fullt utvecklad ens vid 14 % deformation där den uppnått endast 70 % av det förmodade slutvärdet. Detta kan bero på att det i materialet rikligt förekommande vattnet fungerar som ett smörjmedel mellan jordpartiklarna och underlättar deras relativa rörelser. En annan förklaring kan vara att de eventuella kapillära spänningar som råder i det torrare materialet har samma effekt som ett förhöjt värde på minsta huvudspänningen. Det är från många tidigare undersökningar känt att en förhöjning av minsta huvudspänningen resulterar i ett styvare beteende hos materialet.

Det kan inte heller uteslutas att de erhållna skillnaderna mellan torra och våta sidan beror på att brottprocessen är olika i de två fallen. De på torra sidan ofta erhållna spröda brotten bör innebära att Griffith's (1921, 1924) teori är giltig. Denna teori säger att brottet initieras genom förekomsten av dragspänningar i porkanterna. Är teorin tillämplig innebär det att brottvärdena avspeglar draghållfastheten snarare än skjuvhållfastheten. På våta sidan däremot lär Mohr-Coulomb's teori kunna beskriva brottförloppet, varför de erhållna brottvärdena då avspeglar skjuvhållfastheten.

Jämförelsen ovan visar på svårigheten att utifrån laboratorieförsök göra bestämningar av hållfasthetsparametrarna som är användbara i praktiken. Förutom det starka vattenkvotsberoendet hos såväl kohesion som friktionsvinkel så måste deformationsgraden beaktas. Härav följer att hållfastheten i dessa material snarare är ett deformations- än ett gränsvärdesproblem. Svårigheten att ange några explicita värden på hållfasthetsparametrarna är därför uppenbar.

Mot bakgrund av vad som visats ovan kan en jämförelse av hållfasthetsparametrarnas värden vid en bestämd deformation men vid olika vattenkvot och packningsgrad anses som mindre väsentlig. Trots detta kan just en sådan jämförelse vara befogad i avsikt att belysa inverkan av packningsgrad och vattenkvot på hållfastheten, tabell 6.7.

Tabell 6.7 Kohesion (kPa) och friktionsvinkel ($^{\circ}$) utvärderade ur standard triaxialförsök på laboratorie-inpackade provkroppar, vid olika vattenkvot och packningsgrad.

vattenkvot (%)	packningsgrad (%)	c (kPa)	ϕ ($^{\circ}$)
4.4	90	26.7	38.7
7.4	90	42.6	28.7
12.4	90	25.0	29.1
4.7	95	163.2	28.3
7.8	95	109.7	28.4
10.1	95	83.8	27.0

Kohesionen visar ett starkt beroende av packningsgraden. En ökning av packningsgraden från 90 till 95 % resulterar i minst en fördubbling av den uppmätta kohesionen. Vid såväl 90 som 95 % packningsgrad erhöles den högsta kohesionen när provkropparna packats vid optimal vattenkvot.

Friktionsvinkeln uppvisar till skillnad från kohesionen inget beroende av en förändring i packningsgrad från 90 till 95 %. Däremot finns ett beroende av vattenkvoten på så sätt att en ökning av vattenkvoten upp till den optimala resulterar i en minskning av friktionsvinkeln från 38 ned till 28⁰. En ytterligare ökning av vattenkvoten ger däremot ingen ytterligare reduktion av friktionsvinkeln. Denna minskning av friktionsvinkeln med ökande vattenkvot som påvisats kan bero av den, av Lambe påvisade, ökade ordningen i partikelorientering som uppträder med ökande vattenkvot. Det kan även vara så att vattnet fungerar som ett smörjmedel mellan partiklarna och på så sätt underlättar deras inbördes rörelser. I avsikt att öka förståelsen av denna effekt utfördes även aktiva och passiva triaxialförsök.

Aktiva och passiva triaxialförsök

För jämförelsens skull omfattade denna försöksserie även standard triaxialförsök. Vid utvärderingen av försöken användes den tidigare omnämnda principen att om spännings-deformationskurvan saknade peakvärde så valdes värdena på största och minsta huvudspänning vid 10 % axiell deformation som brottvärden. Resultaten från samtliga försök framgår av fig 6.10a och b, där friktionsvinkel respektive kohesion anges som funktion av vattenkvot, packningsgrad och försökstyp.

Av fig 6.10a framgår att kohesionen avtar med ökande vattenkvot för fyra av de sex försöken. De två försöksomgångar vid vilka kohesionen istället växer med ökande vattenkvot är aktivt försök vid 90 % packningsgrad och passivt försök vid 95 % packningsgrad. Av figuren framgår även att kohesionen för samtliga försökstyper är störst vid 100 % packningsgrad och

optimal vattenkvot. Detta är naturligt eftersom jordpartiklarna är som tätast lagrade vid 100 % packningsgrad. Friktionsvinkeln visar liksom kohesionen en generell tendens att avta med ökande vattenkvot. Ett undantag från denna generella tendens utgör aktivt försök vid 95 % packningsgrad, där friktionsvinkeln uppvisar en svag ökning med ökande vattenkvot. Varje försökspunkt i diagrammen baseras på tre försök vilka utförts vid identiska försöksförutsättningar bortsett från det radiella trycket. Dessa tre försök skall teoretiskt ha gemensam brottlinje vilken utvärderats mha linjär regression. Det bör därför vara en förhållandevis stor säkerhet i utvärderingen av försökspunkterna. Icke dessto mindre gav linjen A95 upphov till tvivel om hurvida försökspunkten A; $w=10.7\%$, $R_D=95\%$ verkligen var riktig. För att konfirmera alternativt bestrida denna punkts riktighet utfördes därför tre stycken aktiva triaxialförsök vid vattenkvoten $w=7.7\%$ och packningsgraden $R_D=95\%$, vilket motsvarar en punkt mitt på linjen A95. Ur dessa tre försök utvärderades kohesionen till $c=65.2$ kPa och friktions vinkeln till $\phi=42.1^{\circ}$. Såsom framgår av figuren kom friktionsvinkeln att hamna nära nog på linjen A95. Kohesionen blev något större än vad som svarar mot linje A95. De utförda försöken kan därför inte sägas påvisa att den betvivlade försökspunkten ligger för högt, dvs linjen A95 skall troligen ha en positiv derivata. Orsaken till skillnaden mellan linjerna A95 och S95 kan bero på att försökstyperna skiljs åt i två avseenden. Den ena av skillnaderna utgör olikheten i spänningsväg till brott. Vid de aktiva försöken är medelspänningen i provkroppen före skjuvningsfasen relativt standardförsöken avsevärt högre. Den andra olikheten utgör det faktum att standardförsöken är "strain controlled" medan de aktiva försöken är "stress controlled". För att klargöra om det var det sistnämnda som är upphovet till den erhållna avvikelser mellan standard respektive aktiva försök, utfördes ett specialförsök vilket var ett mellanting av dessa båda försökstyper. Försöket utfördes med den minsta huvudspänningen (den radiella) konstant 75 kPa under hela skjuvningsfasen. Den största huvudspänningen ökades med 11 kPa per minut till

brott. Packningsgraden var 95 % och vattenkvoten 10.7 %. Resultatet från detta specialförsök överensstämde med resultatet från motsvarande standardförsök. Slutsatsen av detta är därför att den avgörande skillnaden mellan standard respektive aktiva försök utgörs av spänningsvägen till brott.

Eftersom friktionsvinkeln på torra sidan erhållen från standard respektive aktiva försök är nära nog lika stor, men avsevärt olika på den våta, är det naturligt att söka förklaringen till detta i skillnaden i struktur mellan torra och våta sidan. Den godtyckliga strukturen på torra sidan tycks medföra att spänningsvägen till brott saknar betydelse för hur friktionen utvecklas. Vid aktiva försök inleds skjuvningsfasen under inverkan av en hög medeleffektivspänning. Den höga medeleffektivspänningen kan eventuellt orsaka en konsolidering av provkroppen. Effekten av en konsolidering bör vara mer märkbar på våta sidan med tanke på det högre vatteninnehållet och den mer välordnade strukturen.

De passiva försöken ger, på våta sidan avsevärt lägre friktionsvinkel än de aktiva och standardförsöken. Även till denna avvikelse torde förklaringen kunna ges av den välordnade strukturen på våta sidan. Eftersom de flakformiga lerpartiklarna under inverkan av den höga vertikala spänningen vid packningen, orienterar sig för att på bästa sätt klara denna spänning så kommer en horisontellt skiktad struktur att erhållas. Vid de passiva försöken är det dock den radiella spänningen som är den största, vilket strukturen är mindre lämpad att klara.

En mycket oväntad omständighet, vad avser friktionsvinkeln, är att den vid de aktiva försöken är avsevärt lägre vid 100 % packningsgrad än vid såväl 90 som 95 %. En möjlig förklaring till detta är att vattenmättningsgraden ökar med ökande packningsgrad och bibehållen vattenkvot. Med ökande vattenmättningsgrad minskar vattenunderskottet i porerna och därmed de kapillära spänningarna.

Avslutningsvis kan beträffande överensstämmelsen alternativt avvikelserna mellan resultaten från de olika försökstyperna konstateras att, beträffande kohesionen är överensstämmelsen bäst på våta sidan, men vad avser friktionsvinkeln är överensstämmelsen bäst på torra sidan.

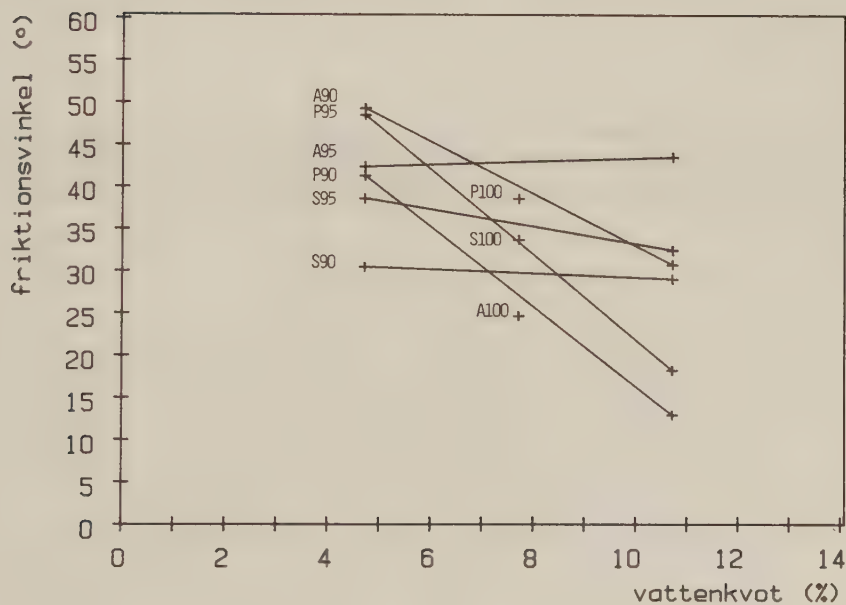
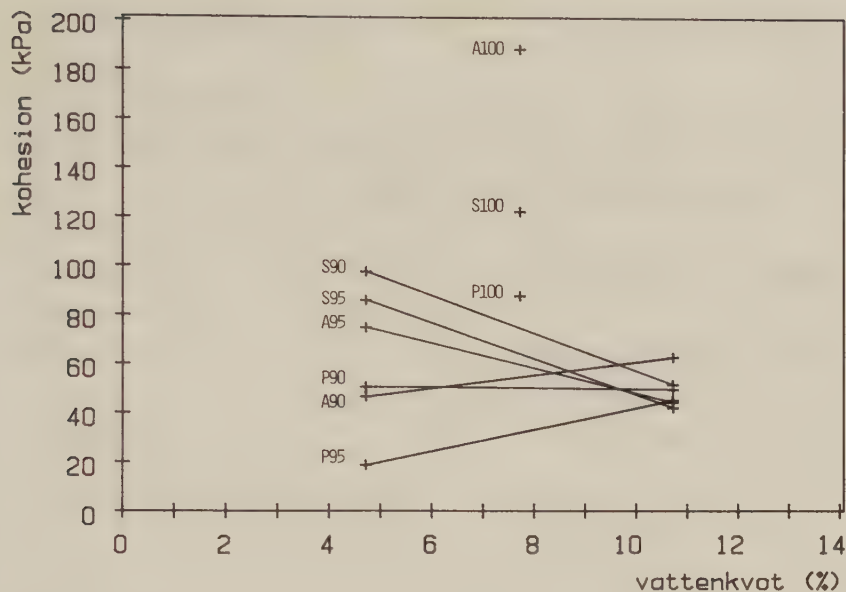


FIG 6.10 Kohesion och friktionsvinkel som funktion av vattenkvot, packningsgrad och försökstyp. A=aktivt försök, S=standard försök och P=passivt försök. 90, 95 och 100 anger packningsgraden.

6.4.8 Kompressibilitet

Ur de från ödometerförsöken erhållna jungfrukurvorna utvärderades modultalet m och spänningsexponenten β . Som jämförelsespänning valdes 100 kPa. Ur ekvationen

$$M = m \cdot \sigma_j^* (\sigma^- / \sigma_j)^{(1-\beta)} \quad (6.12)$$

bestämdes därefter kvoten

$$M / \sigma_j^{(1-\beta)} = m \cdot \sigma_j^{-\beta} \quad (6.13)$$

I tabell 6.8 nedan återges m , β och M för de olika försöken.

Den lägsta kompressibiliteten erhöles vid låga värden på packningsgraden för vattenkvoter nära den optimala. Med ökande packningsgrad erhöles detta vid successivt allt lägre vattenkvot.

Tabell 6.8 Sammanställning av modultal och spänningsexponent, utvärderade ur ödometerförsök på laboratorieinpackade provkroppar, vid olika vattenkvot och packningsgrad.

Försök NR	ρ_d t/m ³	w %	R_D %	e	S_r	β	m	M (MPa)	
								$\sigma=100$ kPa	$\sigma=200$ kPa
1	1,80	4,1	85,6	0,503	0,221	0,33	160	16,0	25,5
2	1,81	6,5	86,0	0,494	0,356	0,73	57	5,7	5,9
3	1,81	11,4	86,0	0,494	0,624	0,64	52	5,2	6,7
4	1,90	4,2	90,3	0,424	0,268	0,38	124	12,4	19,1
5	1,90	7,2	90,3	0,424	0,460	0,76	113	11,3	13,3
6	1,90	12,1	90,3	0,424	0,773	0,55	107	10,7	14,7
7	2,00	4,6	95,1	0,353	0,353	0,70	243	24,3	29,9
8	2,01	7,1	95,5	0,346	0,555	0,47	140	14,0	20,2
9	2,01	9,9	95,5	0,346	0,774	0,19	152	15,2	26,7
10	2,10	8,0	99,8	0,288	0,751	0,27	212	21,2	35,2

7 Försökslokal Gunnesbo

7.1 Allmänt

Lokalen är belägen i nordvästra delen av Lund. Fyllningsarbetena föranleddes av att Alfa-Laval AB stod i begrepp att bygga en industrihall inom området. Området var ursprungligen kuperad åkermark varför omfattande markarbeten var nödvändiga. Inom en begränsad del av området, vilken var avsedd att användas som parkeringsplats, var fyllningsmaktigheten 2-3 m. Det ansågs ur flera synpunkter gynnsamt att lokalisera en försöksyta till just denna del, fig 7.1. Förutom, att fyllningen där var som mäktigast, innebar denna placering att tillträdet till försöksytan maximerades, då iordningställandet av parkeringsplatser låg längst fram i projektets tidplan. Fyllningen lades ut under hösten och förvintern 1976.

De massor som användes till uppfyllnad inom området utvanns inom detsamma genom losstagning med schaktvagnar. Fyllningen lades ut skiktvis med en skikttjocklek av ca 0.3 m. Utläggningen skedde med bandtraktordragen schaktvagn. Bandtraktorns tyngd var 280 kN medan schaktvagnens tyngd med full korg var 370 kN. Packning av respektive skikt utfördes med en vibrerande fårfotsvält på ett oregelmässigt sätt. Någon mer rigorös packning ansågs ej nödvändig med tanke på ändamålet för det framtida användandet samtidigt som viss packning erhöles genom de upprepade överfarter som schaktvagnarna företog i samband med utläggningen.

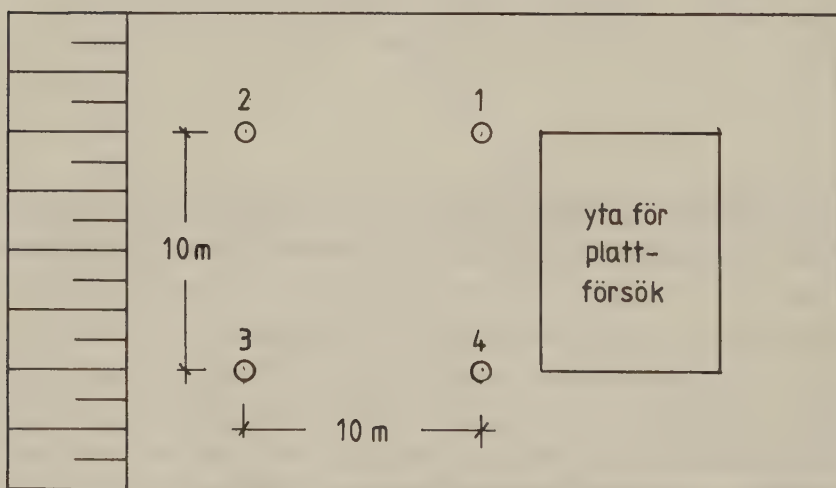
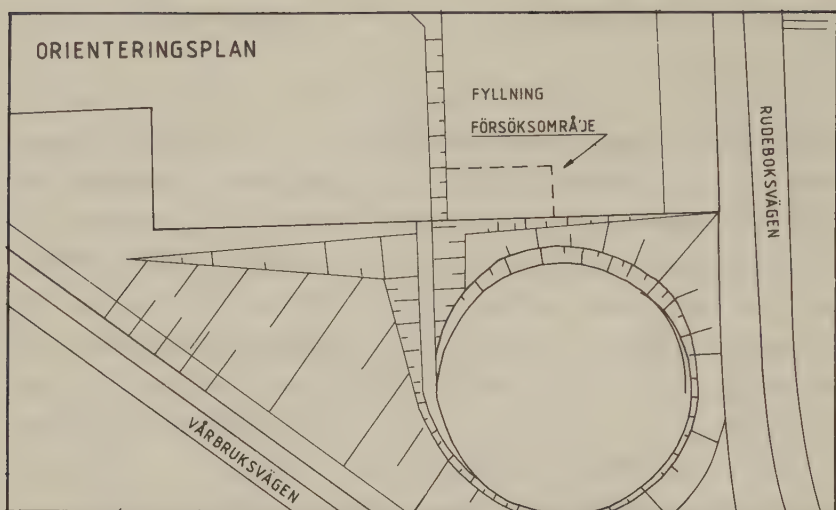


FIG 7.1 Lokalisering av försöksyta, Gunnesbo.

7.2 Fältundersökningar

Inom den tidigare nämnda provytan utfördes två typer av sondering. Dessa var

- viktsondering, maskinell typ Borros
- vingsondering, handhållen

Dessutom utfördes packningsgradsbestämningar med stor vatten-volymeter samt plattbelastningsförsök i halvskala.

7.2.1 Densitetsbestämningar

I samband med ett examensarbete, Andersson & Bjurek (1978), utfördes fyra densitetsbestämningar med samma volymeter som vid lokalen Dubbelknappen, dvs en volymeter för provvolymen mellan 10 och 20 dm³.

7.2.2 Vattenkvotsbestämningar

Trots att vattenkvotsbestämning ej kan sägas vara en fasthetsbestämning så har valts att redovisa dessa under denna rubrik. Vattenkvotsbestämningarna gjordes i samband med vingsonderingarna. Vid vingsonderingarna förborrades ned till i närheten av den nivå på vilken bestämningen skulle göras. Det material som därvid fastnade på skruven användes för vattenkvotsbestämningar.

7.2.3 Viktsondering

Viktsondering utfördes, efter fyllningens färdigställande, i provytans 4 hörnpunkter till ett antal av 3 sonderingar i varje hörnpunkt. Genom att utföra 3 sonderingar i varje punkt erhöles viss uppfattning om inhomogeniteten i fyllningen. Sonderingen utfördes till ett djup av drygt 3 m, vilket avsågs motsvara ca 0.5 m ned i naturlig jord.

7.2.4 Vingsondering

Vingsondering utfördes i samma punkter och till samma antal som viktsonderingen. Den använda vingen var den sk V 5 vingen en dansk vinge med måtten $H \cdot D = 0.1 \cdot 0.05 \text{ m}^2$. Inverkan av stångfriktion eliminerades genom förborrning. Det material som togs upp i samband med förborrningen användes för vattenkvotsbestämningar. Omfattningen av ovan angivna vingsonderingsprogram utökades senare i samband med ett examensarbete sommaren 1977, (Andersson & Bjurek). Då utfördes 41 ytliga vingsonderingar (djup 0.3 m). Avsikten var att klargöra hållfasthetens spridning i planet.

7.2.5 Plattbelastningsförsök

Plattbelastningsförsöken utfördes med 4 olika plattstorlekar alla med cirkulär form. Plattstorlekar och antal utförda försök med varje plattstorlek framgår av tabell 7.1 nedan.

Tabell 7.1 Använda plattstorlekar vid plattbelastningsförsök.

Plattdiameter (m)	Antal
0.15	2
0.28	5
0.60	2
0.90	1

Samtliga plattor var av stål utom den största som var av platsgjuten betong. Försöksutrustningen var i övrigt identisk med den som användes vid Dubbelknappen. För att minska risken för inverkan på bärigheten från tidigare tjälning av de övre jordlagren så schaktades de övre 0.3 m av innan plattbelastningsförsöken utfördes.

7.3 Laboratorieförsök

I likhet med för Dubbelknappen utfördes i laboratoriet ett omfattande försöksprogram. Avsikten var att klargöra vattenkvotens och packningsgradens inflytande på hållfasthet och kompressibilitet. Sålunda utfördes enaxiella tryckförsök för bestämning av den odränerade hållfastheten samt triaxialförsök, av "dioddränerad" typ, för bestämning av den dränerade hållfastheten. Kompressibiliteten undersöktes mha försök i en Rowe-ödometer.

7.3.1 Hållfasthet

Den odränerade hållfastheten bestämdes genom enaxiella tryckförsök på cylindriska provkroppar $H \cdot D = 0.1 \cdot 0.05 \text{ m}^2$. Provkropparna var laboratorieinpackade enligt samma förfarande som beskrivits tidigare. Dubbla försök utfördes vid 4 olika packningsgrader och 3 olika vattenkvoter.

Den dränerade hållfastheten bestämdes genom konsoliderade "dioddränerade" triaxialförsök på inpackade prover. Försöken utfördes för 7 olika kombinationer av vattenkvot och packningsgrad, fig 7.2. För varje sådan kombination utfördes 3 försök med varierande celltryck. Celltrycken var 50, 150 och 500 kPa. Proven tilläts konsolidera ca 12 h innan de skjuvades. Deformationshastighet var 0.002 m/h, vilken bedömdes låg nog för att tillåta provet dränera. Att denna hastighet var tillräckligt låg kontrollerades genom jämförelse med resultaten från försök med hälften så hög deformationshastighet. Eftersom ingen signifikant skillnad erhöles antogs den valda deformationshastigheten ej vara för hög. Försöken avbröts först sedan minst 15 % axiell deformation erhöles.

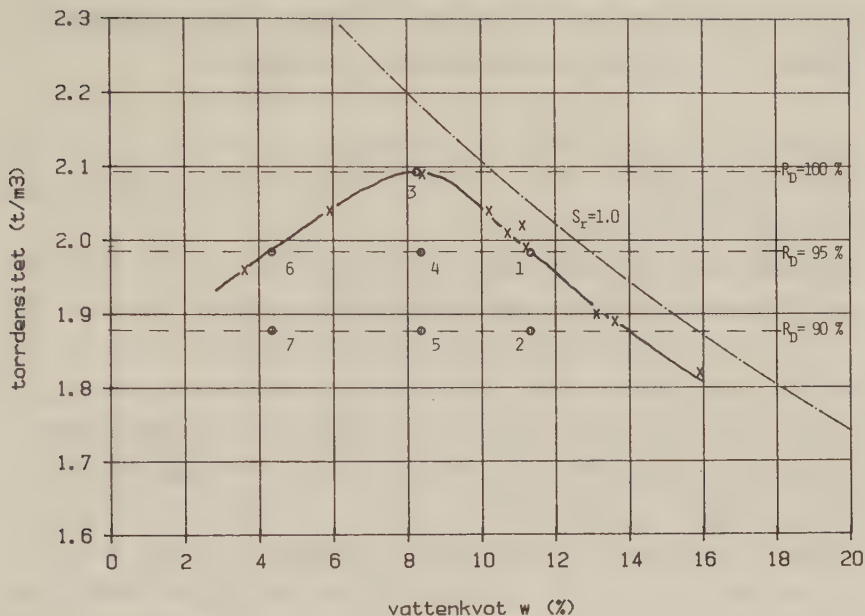


FIG 7.2 Packningskurva med inlagda försökspunkter avseende triaxialförsök.

7.3.2 Kompressibilitet

I avsikt att klargöra vattenkvotens och packningsgradens inflytande på kompressibiliteten utfördes en serie ödometerförsök på inpackade provkroppar. Förfarandet vid tillverkningen av provkropparna var detsamma som vid lokalen Dubbelknappen. Vid försöken användes en Rowe-ödometer med diametern $D=0.0762$ m. I denna typ av ödometer belastas provet mha tryckluft som får verka mot ett gummemembran verkande mot provets övre ändyta. Genom denna konstruktion reduceras inverkan av ringfriktion på den uppmätta kompressionen. Deformationen mätes i den konkava ytans centrum. Försöken utfördes

med dränering i såväl topp som botten. Provet belastades stegvis och följande belastningsrutin användes;

0, 25, 75, 100, 200, 300, 400, 500, 600

300, 400, 500, 600

200, 300, 400, 500, 600

100, 200, 300, 400, 500, 600

50, 100, 200, 300, 400, 500 och 600 kPa.

Att en belastningsrutin med så många återbelastningar användes föranleddes av en önskan att testa en vid DGI använd metod för att utvärdera kompressionsmodulen M. Denna metod beskrivs längre fram under 7.2. Vid varje laststeg avlästes deformationen vid 1/2, 2, 4 min osv. Varje laststeg tilläts verka så länge att deldeformationen i det sista tidsintervallet inte överskred deldeformationen i något av de två närmast föregående tidsintervallen.

7.4. Resultat

7.4.1 Densitetsbestämningar

Resultaten³ från de fyra densitetsbestämningarna med stor (10 till 20 dm³) vattenvolymeter återges i tabell 7.2. Medeltorr-densiteten blev 1.90 t/m³ med standardavvikelsen 0.15 t/m³. Detta motsvarar en packningsgrad $R_D = 91 \pm 7\%$. För att få en uppfattning om vad detta medelvärde och denna standardavvikelse innebär så kan en konkret frågeställning underlätta.

Tabell 7.2 Resultat av densitetsbestämningar med stor vattenvolymeter.

Försökspunkt	1	2	3	4
vattenkvot %	15.5	12.9	13.5	14.1
torrdesitet t/m ³	1.85	1.73	2.08	1.95

Låt oss anta att man önskar avgöra om dessa observationer kan ligga till grund för att förkasta ett påstående att medelpackningsgraden i fyllningen är så låg som $R_D = 80\%$. För att kunna avgöra denna fråga måste vissa antaganden först göras. För det första måste observationerna av packningsgraden vara oberoende vilket är uppfyllt. Dessutom måste antagas att packningsgraden i fyllningen är normalfördelad vilket inte med säkerhet är riktigt. Ofta antas normalfördelning när den verkliga fördelningen är okänd. I detta fall finns det inget som talar emot att normalfördelningen skulle vara den rätta. Låt därför packningsgraden tillhöra $N(\mu, \sigma)$. Om antalet i stickprovet ingående observationer är >30 så gäller enligt Huitfeldt (1972)

$$(x_m - m) / (s^2 / n - 1)^{0.5} \text{ tillhör } N(0,1) \quad (7.1)$$

där

x_m = stickprovets medelvärde

m = medelvärdet i fyllningen

s^2 = stickprovets varians

n = antalet observationer

Då $n < 30$ gäller istället att

$$(x_m - m) / (s^2 / n - 1)^{0.5} = t(n-1) \quad (7.2)$$

om stickprovet är ur populationen $N(m, \sigma)$

Om stickprovet ej är ur populationen så är

$$(x_m - m) / (s^2 / n - 1)^{0.5} > t(n-1) \quad (7.3)$$

Värdet på t beror förutom av n även på vilken konfidensnivå, α , som är acceptabel. Med konfidensnivå avses den risk med vilken man är beredd att göra ett felaktigt förkastande av ett påstående. Med detta uttryck kan därför testas huruvida ett stickprov härrör från den ena eller andra populationen. I det aktuella fallet skulle testas huruvida stickprovet

$x_m = 91$

$s^2 = 49$

$n = 4$

kan härröra från populationen $N(80, \sigma)$. Därför erhålles

$$(x_m - m) / (s^2 / n - 1)^{0.5} = 2.72$$

Detta värde skall således jämföras med t -fördelningens värde för $n-1=3$ vid aktuellt värde på α . För $\alpha=0.05$ är $t=2.35$ och för $\alpha=0.025$ är $t=3.18$. Det aktuella värdet 2.72 ligger mellan dessa båda värden. Om det är acceptabelt att felaktigt förkasta påståendet med en risk av 5 % så kan påståendet förkastas. Är man inte villig att ta större risk än 2.5 % så måste stickprovet accepteras som varande ett stickprov från

populationen $N(80, \sigma)$.

Om istället stickprovet hade haft följande utseende

$$\bar{x}_m = 91$$

$$s^2 = 49$$

$$n = 35$$

så hade det första uttrycket kunnat användas och därvid givit

$$(\bar{x}_m - m) / (s^2 / (n-1))^{0.5} = (91-80) / (49/34)^{0.5} = 8.33$$

Detta värde 8.33 är så stort att det faller utanför de statistiska tabellerna, se ex vis "Tabeller över statistiska fördelningar" av Blom. Det innebär i detta fall att sannolikheten för att stickprovet skulle erhålla medelvärdet $\bar{x}_m > 90$ om det härrör från populationen $N(80, \sigma)$, är mycket nära noll. Sannolikheten att stickprovet skall erhålla ett medelvärde $\bar{x}_m > 90$ om det härrör från en population $N(89, \sigma)$ kan på samma sätt beräknas till

$$(90-89) / (49/34)^{0.5} = 0.83$$

vilket motsvarar en sannolikhet 0.2. Hade standardavvikelsen istället för 7 varit 10 (% packningsgrad) så skulle istället erhållits

$$(90-89) / (100/34)^{0.5} = 0.58$$

vilket ger sannolikheten 0.28.

Som synes så är styrkan i ett medelvärde av ett så pass stort stickprov som $n=35$ mycket stor. Om istället för ett stickprov utförs en enda observation och sannolikheten beräknas, att värdet av denna observation är $x_i > 90$ % packningsgrad, trots att observationen härrör från en population $N(80, 7)$, så blir resultatet ett helt annat. Då gäller nämligen att

$$(90-80)/10 \text{ tillhör } N(0,1)$$

varför

$$(90-80)/7 = 1.43$$

ger sannolikheten 0.08. Sannolikheten att en enskild observation skall ge ett värde på packningsgraden överstigande 90 % om den härrör från en population $N(80,10)$ blir med motsvarande beräkning 0.16. En ökning av standardavvikelsen från 7 till 10, dvs en ökning med knappt 50 %, resulterar således i en fördubbling av sannolikheten för att en enskild observation skall ge ett värde på packningsgraden som är större än 90 %, trots att fyllningens verkliga medelvärde är 80 %.

Granström & Wellander (1975) visade i en jämförande undersökning av spridningen erhållen med tre olika stora vattenvoly-metrar i lermorän, att den vanligen använda standardvoly-metern ger ca 3 ggr så stor standardavvikelse som den vid Gunnesbo använda volymetern. Överförs deras resultat till Gunnesbo-lokalen skulle detta innebära en standardavvikelse $s=21\%$ med standardvoly-meter. Återknyts kontakten med exemplet ovan medför detta att sannolikheten för att, med standardvoly-metern erhålla ett enskilt värde på packningsgraden överstigande 90 %, trots att medelvärdet i fyllningen är $R_D=80\%$, blir så hög som 0.32.

Av vad som ovan visats inses att det är synnerligen viktigt att vid packningskontroll använda metoder som inte ger onödigt stor spridning i mätresultatet. Detta gäller för övrigt naturligtvis vid all form av mätverksamhet.

7.4.2 Vattenkvotsbestämningar

Resultaten från vattenkvotsbestämningarna, tabell 7.6, visar att vattenkvoten i fyllningen i medeltal är 16.8 %, med standardavvikelsen 1.3 %. Dessa beräkningar grundar sig på 36 observationer gjorda på 9 nivåer i var och ett av fyra borrhål. Då optimala vattenkvoten för materialet i laboratorium bestämts till 8.3 % framgår det klart att vattenkvoten i fyllningen är belägen långt på våta sidan. Vid denna bestämning av vattenkvoten vilken företogs i omedelbar anslutning till fyllningens färdigställande var dess medelvärde i fyllningens översta 0.3 m lika med 17.5 %. I samband med densitetsbestämningarna som gjordes ca 1/2 år efter fyllningens färdigställande erhöles även bestämningar av vattenkvoten i fyllningens översta 0.3 m. Medelvattenkvoten var då 14.0 % vilket visar på att en upptorkning av fyllningens övre delar ägt rum.

7.4.3 Viktsondering

Resultaten från de totalt 12 utförda viktsonderingarna återges i tabell 7.3. Från djupet 0.6 m till och med 2.8 m är de erhållna motstånden indelade i tre block. För vart och ett av de tolv blocken har medelvärde och standardavvikelse uträknats. Syftet med denna indelning har varit att på ett någorlunda överskådligt sätt belysa de variationer i sonderingsmotstånd som kan uppträda i en otillräckligt packad fyllning.

Tabell 7.3 Sammanställning av viktsonderingsmotstånd (hv/0.2 m). Av tabellen framgår även den blockindelning som har legat till grund för beräkningen av medelvärde och standardavvikelse återges i tabell 7.4.

djup	punkt 1			punkt 2			punkt 3			punkt 4		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
-0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-0.4	3	-	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
.....												
-0.6	2	2	2	2	9	6	1	2	1	2	3	2
-0.8	9	(35)	10	3	4	4	7	0	0	0	0	0
-1.0	8	19	7	3	4	9	4	0	0	2	3	0
-1.2	9	9	14	4	3	16	2	3	5	3	9	3
.....												
-1.4	12	5	11	5	4	3	7	2	6	11	4	9
-1.6	10	6	9	9	14	(47)	8	5	9	7	4	4
-1.8	6	9	3	(78)	(33)	21	10	6	12	3	0	2
-2.0	5	6	5	7	5	20	12	7	15	2	0	0
.....												
-2.2	7	7	5	6	3	9	8	12	15	3	2	0
-2.4	6	4	4	6	2	9	7	10	18	0	2	0
-2.6	4	4	3	7	5	10	12	15	22	0	0	2
-2.8	17	10	5	10	12	11	23	22	(54)	3	0	0

De värden som står inom parentes i tabellen har ej medtagits vid beräkningen av medelvärden och standardavvikelser, vilka återges i tabell 7.4.

Tabell 7.4 Medelvärde och standardavvikelse av viktsonderingsmotståndet (hv/0.2 m) i respektive block enligt tabell 7.3.

djup	punkt 1		punkt 2		punkt 3		punkt 4	
:	:	:	:	:	:	:	:	:
.....	:	:	:	:	:	:	:	:
0.6-	:1 m= 8.27	:2 m= 5.58	:3 m= 2.08	:4 m= 2.25	:	:	:	:
1.2	: s= 5.22	: s= 3.99	: s= 2.28	: s= 2.49	:	:	:	:
.....	:	:	:	:	:	:	:	:
1.4-	:5 m= 7.25	:6 m= 9.78	:7 m= 8.25	:8 m= 3.83	:	:	:	:
2.0	: s= 2.83	: s= 6.91	: s= 3.57	: s= 3.56	:	:	:	:
.....	:	:	:	:	:	:	:	:
2.2-	:9 m= 6.33	:10 m= 7.50	:11 m=14.91	:12 m= 1.00	:	:	:	:
2.8	: s= 3.87	: s= 3.18	: s= 5.72	: s= 1.28	:	:	:	:
.....	:	:	:	:	:	:	:	:

För att kunna avgöra om variationerna i sonderingsmotstånd har sitt ursprung i motsvarande variationer i vattenkvot har en tabell liknande den för sonderingsmotstånden upprättats för vattenkvoterna, se tabell 7.5.

Tabell 7.5 Vattenkvotens medelvärde och standardavvikelse i respektive block. Blockindelningen är densamma som för viktsonderingsmotstånden enligt tabell 7.4.

djup	:	punkt 1	:	punkt 2	:	punkt 3	:	punkt 4	:
.....	:		:		:		:		:
0.6-	:	1 m=15.6	:	2 m=18.5	:	3 m=17.5	:	4 m=16.8	:
1.2	:	s= 1.3	:	s= 1.3	:	s= 0.1	:	s= 0.9	:
.....	:		:		:		:		:
1.3-	:	5 m=17.0	:	6 m=15.9	:	7 m=16.7	:	8 m=16.6	:
2.0	:	s= 3.4	:	s= 4.4	:	s= 0.3	:	s= 0.1	:
.....	:		:		:		:		:
2.1-	:	9 m=15.4	:	10 m=17.1	:	11 m=14.9	:	12 m=17.6	:
2.7	:	s= 3.9	:	s= 1.1	:	s= 2.8	:	s= 0.1	:

Av dessa tabeller (7.4 och 7.5) kan inget entydigt samband mellan hög vattenkvot och lågt sonderingsmotstånd utläsas. Man finner dock, om man ordnar sonderingsmotståndens medelvärde för respektive block (i ordning) från det största till det minsta, och medelvärdena av vattenkvoterna i ordning från det lägsta till det högsta, att de fyra högsta sonderingsmotstånden återfinnes i samma block som de sex lägsta vattenkvoterna.

Block med sonderingsmotstånd från det högsta till det lägsta:

11, 6, 1, 7, 10, 5, 9, 2, 8, 4, 3 och 12.

Block med vattenkvoter från den lägsta till den högsta:

11, 9, 1, 6, 8, 7, 4, 5, 10, 3, 12 och 2.

För att uttrycka styrkan i koppling mellan de två följderna kan ett statistiskt hjälpmedel kallat Spearman's rangkorrelationskoefficient användas, se Huitfeldt (1972)

$$r_s = 1 - (6 \sum_{j=1}^n d_j^2) / (n^3 - n) \quad (7.4)$$

där

r_s = Spearman's rang.korr.koeff. (varierar mellan -1 och +1)

d_j = differensen i ordningstal för element j i de två följderna

n = antalet element i en följd

Om $r_s = +1$ så är korrelationen mellan följderna total. Vid omvänd total korrelation blir $r_s = -1$. Är r_s nära noll är korrelationen mellan följderna försumbar.

Beräknas r_s för följderna ovan så erhålles

$$\sum_{j=1}^n d_j^2 = (0^2 + 2^2 + 0^2 + 3^2 + 4^2 + 2^2 + 5^2 + 4^2 + 4^2 + 3^2 + 1^2 + 1^2)$$

$$\text{dvs } \sum_{j=1}^n d_j^2 = 96$$

och

$$r_s = 1 - (6 \cdot 96) / (12^3 - 12) = 0.66$$

Av uppställningen av sonderingsmotstånd framgår att tre av de fyra lägsta motstånd härrör från punkt 4. Av de fyra högsta vattenkvoterna kommer endast en från punkt 4. Det är därför möjligt att slumpen inverkat så att packningsarbetet är lägre vid punkt 4 än vid övriga punkter. Om därför de värden i serierna ovan som härrör från punkt 4 strykes, så erhålles en starkare koppling mellan vattenkvot och sonderingsmotstånd. Serierna blir,

11, 6, 1, 7, 10, 5, 9, 2 och 3

för sonderingsmotståndet, och

11, 9, 1, 6, 7, 5, 10, 3 och 2

för vattenkvoten.

vilket ger

$$r_s = 0.70$$

Efter denna reduktion av serierna är deras likhet slående. Det existerar egentligen endast en påtaglig avvikelse mellan dem. Skillnaden ligger i att sonderingsmotståndet i block 9 inte är så högt som det, med tanke på den relativt låga vattenkvoten, borde vara. Detta kan eventuellt förklaras av att medelvattenkvoten i block 9 visserligen är låg men samtidigt är standardavvikelsen relativt hög. Detta innebär att vattenkvoten varierat kraftigt i block 9.

7.4.4 Vingsondering

Resultaten från den inledande serien vingsonderingar visar på en relativt god överensstämmelse mellan sonderingar gjorda i samma hörnpunkter. Såväl i djupled som i plan är dock de uppträdande variationerna stora. Resultaten från sonderingarna har delats in i tre block med avseende på djupet under markytan. Alla resultat härrörande från bestämningar gjorda mellan 0 och 1 m djup utgör ett block. På samma sätt bildar resultaten från djupen 1 till 2 m och 2 till 3 m var sitt block. Inom varje sådant block existerar bestämningar från tre olika djup från tre sonderingar i vardera av de fyra hörnpunkterna varför ett block totalt omfattar $3 \times 3 \times 4 = 36$ observationer. Den uppmätta fastheten har delats in i intervall med bredden 20 enheter med det första intervallet från 0 till 20. Genom detta förfarande kunde sedan frekvensdiagram upprättas för de tre blocken. Dessa återges i fig 7.3 a-c. För vart och ett av blocken har dessutom medelvärde och standardavvikelse beräknats. Ur frekvensdiagrammen kan även ett ungefärligt medianvärde uppskattas. I nedanstående tabell 7.6, återges dessa framräknade storheter.

Tabell 7.6 Medelvärde, standardavvikelse och medianvärde från vingsondering, i olika djupintervall.

Djup	medelvärde	standard avvikelse	medianvärde
0-1	64.5	51.0	40- 60
1-2	87.7	40.8	80-100
2-3	99.1	45.7	80-100

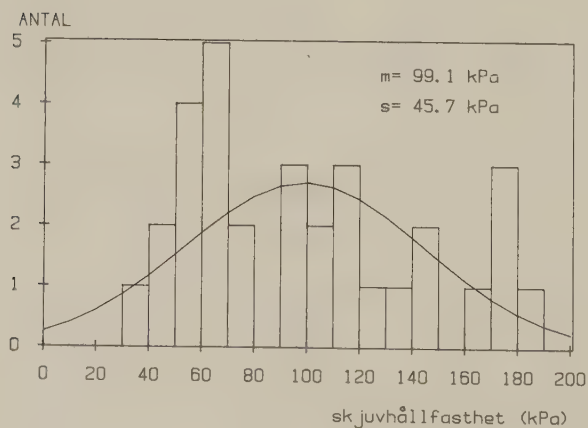
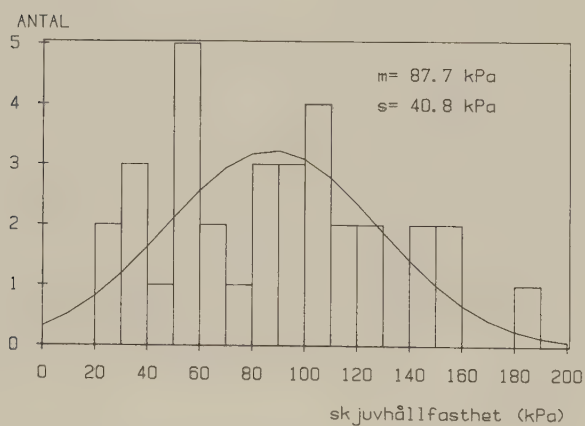
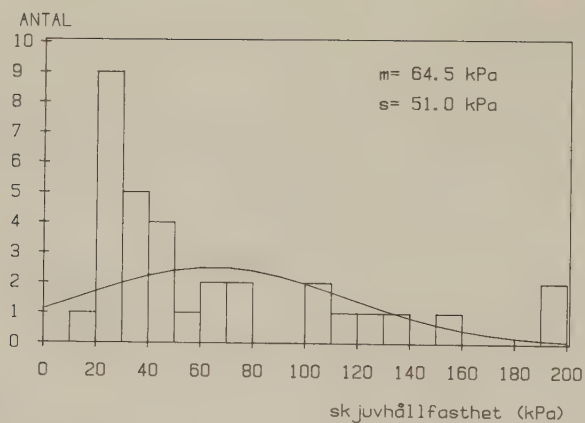


FIG 7.3 Frekvensdiagram över fastheten enligt vingsond.
 a / 0-1 m djup
 b / 1-2 m djup
 c / 2-3 m djup

Som framgår av såväl frekvensdiagrammen som de framräknade värdena på standardavvikelserna så är spridningen stor. Jämförelser av medel- kontra medianvärden avslöjar, som för övrigt även frekvensdiagrammen, en klar snedfördelning av värdena sådan att medelvärdet är högre än medianvärdet. Detta är ett uttryck för att metoden oftare ger för höga än för låga värden, vilket är helt naturligt. Förekomsten av sten i fyllningen orsakar alltid att extremvärden erhålles. För lågt uppmätta värden kan bara erhållas som ett resultat av hålrum i fyllningen. Med tanke på fyllningsmaterialets relativt höga lerhalt, ca 20 %, i kombination med den höga vattenkvot det hade vid packningen, är förekomsten av betydande hålrum osannolikt. Vid en jämförelse av medianvärdena på de olika djupen framgår en markant ökning från djupet 0-1 m till 1-2 m. Orsaken till denna ökning är svår att utpeka men några olika tänkbara anledningar kan skönjas.

- De djupare liggande delarna av fyllningen har utsatts för ett totalt sett större packningsarbete, eftersom dessa påverkats inte enbart av det packningsarbete som varit avsett för just detta skikt, utan även av den packning som utförts av ovanförliggande skikt.

- De djupare liggande jordmassorna har fått vila längre tid sedan de utsattes för ett direkt packningsarbete, vilket, i kombination med det högre överlagringstrycket på större djup, orsakat en konsolidering och sänkning av eventuella porvattenövertryck.

- Fyllningsmassan fungerar som en friktionsjord och det ökade värdet är en funktion av det högre överlagringstrycket.

Av dessa tre tänkbara orsaker så är den tredje den som verkar minst trolig. Mot denna förklaring talar dels lerhalten på 20 % samt att ökningen i medianvärde ej kvarstår från intervallet 1-2 m till 2-3 m. Den troligaste förklaringen förefaller den 2:a vara, men till del kan även den första för-

klaringen äga giltighet.

De ytliga vingsonderingar som utfördes ca 1/2 år efter fyllningens färdigställande visar, jämfört med tidigare sonderingar på kraftigt förhöjda fasthetsvärden i fyllningens övre delar. Resultatet från dessa sonderingar redovisas i ett frekvensdiagram i fig 7.4. Medelvärde av de 41 sonderingarna är 106 och medianvärdet ligger i intervallet 90-110. Den erhållna symmetriska fördelningen skiljer sig markant från den sneda fördelning som erhöles för de ytliga sonderingsvärdena från tidpunkten för fyllningens färdigställande. Den stora andelen låga värden som då erhöles har försvunnit, förmodligen som ett resultat av den uttorkning som ägt rum.

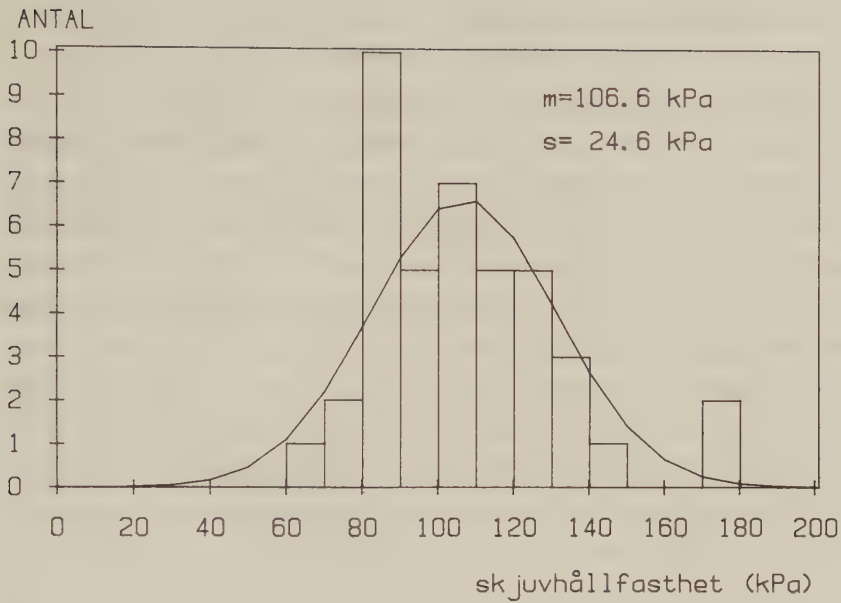


FIG 7.4 Frekvensdiagram över fastheten enligt vingsond vid ytlig sondering 1/2 år efter fyllningens färdigställande.

7.4.5 Plattbelastningsförsök

Vid plattbelastningsförsök på jordar av typ fyllningen på Gunnesbo erhålls ofta en last-deformationskurva där en klar brytpunkt vid uppnådd bärighet saknas. En av Hartleⁿ (1974) föreslagen metod innebär att bärigheten i dessa fall låter sig definieras av kryptrycket. Kryptrycket utvärderas som den brytpunkt som erhålles på kurvan som beskriver sambandet mellan grundtryck och uppmätt krypning i ett visst tidsintervall. Här har valts tidsintervallet 8-16 min. De på detta sätt erhållna kryptrycken visade sig vara starkt beroende av plattstorleken. Kryptrycket är störst för den minsta plattan och avtar kontinuerligt med ökad plattstorlek. Ett liknande volymsberoende påvisades av Hartleⁿ (1974) vid plattbelastningsförsök på naturlig lermorän.

Förutom det starka volymsberoendet hos kryptrycket så är dess låga värden anmärkningsvärda. För den minsta plattan erhöles ett kryptryck varierande mellan 170 och 190 kPa och för den största var det så lågt som ca 40 kPa. Sett mot bakgrund av att skjuvhållfastheten enligt vingsondering uppvisar ett medianvärde varierande mellan 40 och 100 kPa så är de erhållna kryptrycken mycket låga. Bärigheten med en bärighetsfaktor $N_c = 5$ borde ligga någonstans mellan 200 och 500 kPa. Den stora avvikelserna mellan erhållna kryptryck och utifrån vid vingsondering beräknad bärighet, kan till del vara en funktion av samma volymsberoende som slår igenom på de uppmätta kryptrycken. Förutom att vingsonden påverkar en relativt liten jordvolym så är den yta utmed vilken brottet sker tvångsstyrd. Med tanke på den strukturella uppbyggnaden av en lermoränfyllning, vilken utgörs av mer eller mindre väl sammanältade jordklumpar, så kan denna tvångsstyrning av brottytan vara mycket utslagsgivande. Dessa förhållanden måste anses styrka uppfattningen att värdet erhållet vid vingsondering ej får ses som ett värde på den odränerade skjuvhållfastheten, utan snarare som ett fasthetsvärde.

Då frågan om vilka grundtryck som kan tillåtas i lermoränfyllningar visat sig vara ett deformationsproblem snarare än ett brottproblem finns det anledning att ur plattbelastningsförsöken utvärdera kompressionsmodulen enligt Jaky. Detta är, i tabell 7.7, gjort för de 11 plattbelastningsförsöken vid ett grundtryck som motsvarar halva kryptrycket för respektive försök.

Kryptrycket visade sig vara starkt beroende av plattstorleken men detta kan inte anses gälla kompressionsmodulen. Bilden är tämligen splittrad vilket belyses av att den högsta modulen erhöles för den största plattan och den minsta vid ett av försöken med den näst största plattan. Ej heller synes något beroende av, den under respektive platta uppmätta, vattenkvoten finnas. Sammanfattningsvis gäller att kompressionsmodulen varierar mellan 3 och 15 MPa.

Tabell 7.7 Kompressionsmoduler utvärderade enligt Jaky från plattbelastningsförsök med olika plattstorlekar.

Platt- försök nr	Diameter D (m)	Grundtryck q (kPa)	Sättning s (m)	Vatten- kvot w (%)	Kompressions- modul M (MPa)
1	0,28	55,0	$1,75 \cdot 10^{-3}$	14,6	9,4
2	0,28	65,0	$1,65 \cdot 10^{-3}$	14,5	11,7
3	0,28	62,5	$1,20 \cdot 10^{-3}$	12,8	15,5
5	0,28	57,5	$0,90 \cdot 10^{-3}$	13,2	19,1
6	0,28	45,0	$0,52 \cdot 10^{-3}$	14,0	25,8
7	0,60	30,0	$3,06 \cdot 10^{-3}$	14,1	6,3
8	0,60	28,0	$1,85 \cdot 10^{-3}$	14,7	9,7
9	0,15	85,0	$0,56 \cdot 10^{-3}$	13,3	24,3
10	0,15	95,0	$0,80 \cdot 10^{-3}$	13,3	19,0
11	0,90	20,0	$0,58 \cdot 10^{-3}$	14,8	33,0

7.4.6 Hållfasthet

Odränerad hållfasthet

Den odränerade hållfastheten bestämd genom enaxiella tryckförsök på laboratorie-inpackade prover visade sig vara starkt beroende av såväl packningsgrad som vattenkvot. I tabell 7.8 är resultaten från samtliga försök återgivna. Denna kan dock vara något svåröverskådlig varför den odränerade hållfastheten som funktion av packningsgrad och vattenkvot återges i fig 7.5. Av fig 7.5 framgår att packningsgradens betydelse avtar med ökande vattenkvot. En ökning av vattenkvoten resulterar genomgående i en minskning av den odränerade hållfastheten och denna minskning är större ju högre packningsgraden är. Av tabell 7.9 framgår även att brottdeformationens storlek beror av såväl vattenkvot som packningsgrad. De sprödaste brotten erhöles vid 85 % packningsgrad och optimal vattenkvot. För samtliga packningsgrader erhöles det sprödaste brottet vid optimal vattenkvot, men sprödheten avtog med ökad packningsgrad. Vid vattenkvoter under den optimala var brottdeformationens storlek i stort oberoende av packningsgraden. På våta sidan tenderade brottdeformationens storlek att öka med ökande packningsgrad.

Tabell 7.8 Odränerad skjuvhållfasthet (kPa), bestämd genom enaxiella tryckförsök på laboratorieinpackade provkroppar, vid olika vattenkvot och packningsgrad.

Försök	ρ_d	w	R_D	e	S_r	ϵ_{BR}	τ_{fu}	E
Nr	t/m ³	%	%			%	kPa	kPa
1:1	1,98	11,9	94,7	0,348	0,912	5,0	133,1	8940
1:2	1,98	11,6	94,7	0,348	0,889	5,5	122,8	6846
2:1	1,88	11,4	90,0	0,420	0,724	3,5	100,7	10010
2:2	1,86	12,5	89,0	0,435	0,766	2,5	74,5	8049
2:3	1,87	11,7	89,5	0,428	0,730	4,5	111,9	8189
4:1	1,99	8,9	95,2	0,342	0,695	2,5	223,5	11269
4:2	2,00	8,7	95,7	0,335	0,693	2,0	229,6	22695
5:1	1,89	7,9	90,4	0,413	0,511	2,5	121,7	7647
5:2	1,88	8,2	90,0	0,420	0,521	2,2	137,0	9618
6:1	1,99	4,3	95,2	0,342	0,336	2,7	434,7	9493
6:2	1,99	4,6	95,2	0,342	0,359	2,9	459,1	5787
6:3	1,97	5,8	94,3	0,355	0,436	1,9	220,1	11299
7:1	1,89	3,8	90,4	0,413	0,246	3,2	245,0	6078
7:2	1,88	4,2	90,0	0,420	0,267	2,3	297,8	13869
8:1	2,08	6,4	99,5	0,284	0,602	2,5	260,7	16500
9:1	2,08	9,1	99,5	0,284	0,857	4,0	244,5	17473
9:2	2,08	8,9	99,5	0,284	0,838	5,5	219,1	14592
10:1	2,02	11,9	96,7	0,322	0,987	4,5	133,8	9295
10:2	2,02	11,7	96,7	0,322	0,971	6,2	95,6	4777
10:3	2,05	9,8	98,1	0,302	0,865	5,0	118,6	7947
10:4	2,07	9,0	99,0	0,290	0,829	4,0	166,3	13979
11:1	1,98	12,4	94,7	0,348	0,950	5,5	103,5	6305
11:2	2,01	11,1	96,2	0,328	0,903	5,0	113,7	7351
11:3	2,01	11,3	96,2	0,328	0,919	4,0	109,4	8986
13:1	1,88	13,9	90,0	0,420	0,883	8,0	39,8	1589
13:2	1,88	13,4	90,0	0,420	0,851	8,0	51,5	2079
14:1	1,77	14,5	84,7	0,508	0,761	7,0	42,6	2247
14:2	1,78	14,1	85,2	0,500	0,753	5,0	36,3	2583
15:1	1,79	10,5	85,6	0,492	0,570	2,5	94,4	12163
15:2	1,79	10,4	85,6	0,492	0,565	2,0	77,4	12104
16:1	1,78	8,2	85,2	0,500	0,438	1,0	118,5	31426
16:2	1,79	7,8	85,6	0,492	0,424	1,5	112,9	18876
17:1	1,78	4,0	85,2	0,500	0,214	2,0	147,3	14626

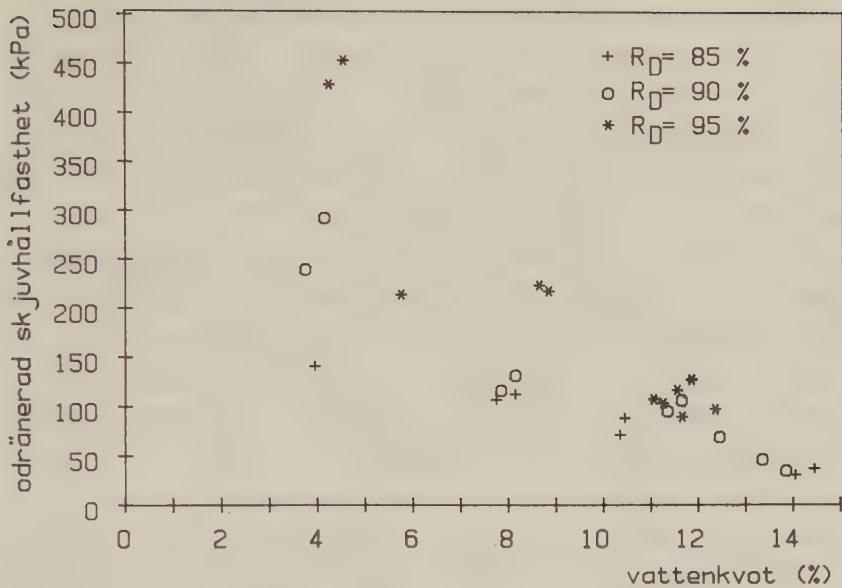


FIG 7.5 Odränerad skjuvhållfasthet enligt enaxiellt tryckförsök som funktion av vattenkvot och packningsgrad.

Dränerad hållfasthet

Utvärderingen av hållfasthetsparametrarna har skett enligt samma förfarande som vid försökslokal Dubbelknappen. Motvarande jämförelse av kohesionens och friktionsvinkelns utveckling med deformationen för material inpackat till 90 % packningsgrad på våta respektive torra sidan återges i fig 7.6a och b. Tendensen är, vad avser både kohesion och friktionsvinkel, densamma som för materialet från Dubbelknappen. Kohesionen avtar på torra sidan med ökande deformation ned till ett residualvärde. På våta sidan ökar kohesionen något med ökande deformation och är vid långt driven deformation

ungefär densamma som residualvärdet på torra sidan.

På torra sidan ökar friktionsvinkeln med ökande deformation upp till ett maxvärde vid ca 8 % deformation för att sedan avta något. På våta sidan ökar friktionsvinkeln genomgående men har vid 15 % deformation inte uppnått mer än 60 % av den maximala friktionsvinkeln på torra sidan.

Av ovan gjorda jämförelser framgår otvetydigt såväl vattenkvotens som den axiella deformationens stora betydelse för hållfasthetsparametrarna. För att få en uppfattning om hur kohesion och friktionsvinkel utvärderad, vid långt (10 %) driven deformation, beror av vattenkvot och packningsgrad sammanställdes dessa data i tabell 7.9.

Tabell 7.9 Kohesion (kPa) och friktionsvinkel ($^{\circ}$), bestämd genom standard triaxialförsök på laboratorieinpackade provkroppar, vid olika vattenkvot och packningsgrad.

R_D (%)	w-w _{opt} (%)	c ⁻ (kPa)	ϕ ⁻ ($^{\circ}$)	C ₀ (kPa)
90	-3.8	53	38.4	219
90	0	134	22.1	398
90	+3.0	76	20.8	110
95	-3.8	67	39.4	283
95	0	104	29.9	360
95	+3.0	98	20.6	283
100	0	86	38.6	357

Som framgår av tabellen minskar friktionsvinkeln markant med ökande vattenkvot vid såväl 90 som 95 % packningsgrad. Den erhållna kohesionen är störst vid optimal vattenkvot både vid 90 och 95 % packningsgrad. Kohesionen vid optimal vattenkvot synes för övrigt avta med ökande packningsgrad under det att friktionsvinkeln istället tillväxer. För att erhålla en uppfattning om den sammanlagda effekten av dessa variationer på hållfastheten, så är i tabellen även angivet den enaxiella tryckhållfastheten

$$C_0 = 2 * c * \tan (45 + \phi / 2) \quad (7.5)$$

Den enaxiella tryckhållfastheten visar sig vara störst vid optimal vattenkvot för såväl 90 som 95 % packningsgrad. Anmärkningsvärt nog synes tryckhållfastheten inte öka med ökande packningsgrad vid optimal vattenkvot. Vid 90 % packningsgrad är tryckhållfastheten på torra sidan 100 % större än på den våta. Denna skillnad mellan torra och våta sidan försvinner vid en ökning av packningsgraden till 95 %. Av tabellen framgår att orsaken till detta är den relativt stora ökningen av kohesionen som inträffar på våta sidan vid en ökning av packningsgraden från 90 till 95 %. Friktionsvinkelns storlek påverkas inte alls på den våta sidan av ökningen i packningsgrad från 90 till 95 %, men på torra sidan erhålles en mindre ökning.

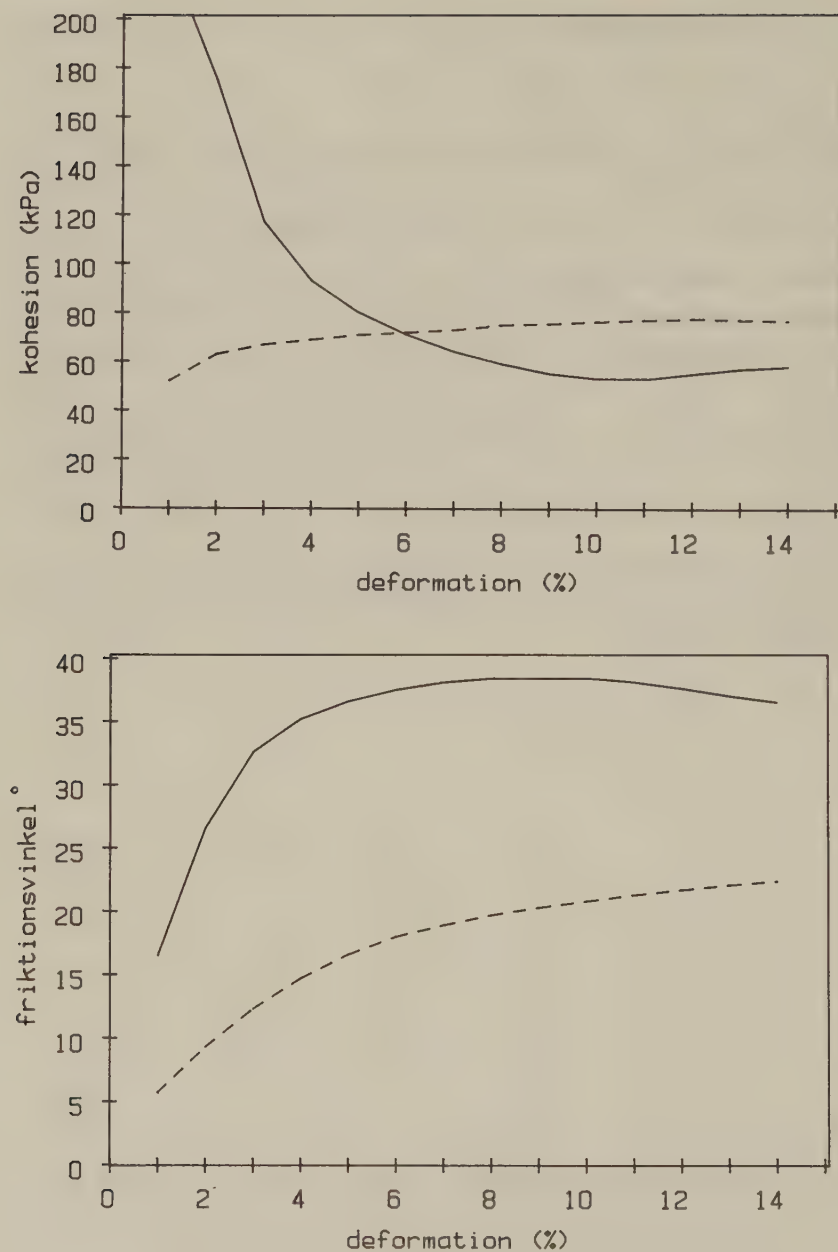


FIG 7.6 Kohesionens och friktionsvinkelns utveckling med deformationen i material inpackat till 90 % packningsgrad (tung lab stampning) vid torr- respektive våtpackning ($w_{opt}=8.3\%$)
 ————— $w = 4.5\%$, - - - - - $w = 11.3\%$

7.4.7 Kompressibilitet

Ur spännings-deformationskurvan utvärderades modultalet m och spänningsexponenten β vid en jämförelsespänning 100 kPa. Kompressionsmodulen M definieras av ekv 6.11.

De erhållna värdena på modultal, spänningsexponent och kompressionsmodul återges i tabell 7.10. I tabellen återges även tillhörande värden på packningsgrad, portal, vattenkvot och vattenmättningsgrad.

Tabell 7.10 Modultal, spänningsexponent och kompressionsmodul (MPa), erhållna ur ödometerförsök på laboratorie-inpackade provkroppar, vid olika vattenkvot och packningsgrad.

torrdens.	R_D	por-	w	S_r	m	β	M	
t/m3	(%)	tal	(%)				(MPa)	
							$\sigma=100$	$\sigma=200$
							(kPa)	
1.79	85.6	0.49	13.3	0.72	69	0.85	6.9	7.7
1.87	89.4	0.43	4.8	0.30	478	0.68	47.8	59.7
1.88	89.9	0.42	8.5	0.54	426	0.55	42.6	58.2
1.88	89.9	0.42	11.4	0.72	99	0.65	9.9	12.6
1.88	89.9	0.42	12.6	0.80	55	0.96	5.5	5.6
1.89	90.3	0.41	13.3	0.86	61	0.80	6.1	7.0
1.98	94.6	0.35	4.7	0.36	446	0.60	44.6	58.9
1.99	95.1	0.34	7.9	0.62	300	0.46	30.1	43.7
1.98	94.6	0.35	8.6	0.66	237	0.64	23.7	30.4
1.98	94.6	0.35	11.7	0.90	111	0.64	11.1	14.3
2.07	98.9	0.29	9.3	0.86	190	0.41	19.1	28.7
2.09	99.9	0.28	8.3	0.80	190	0.46	19.0	27.6

Ur återbelastningsgrenarna utvärderades kompressionsmodulen enligt den vid DGI använda metoden. Tanken bakom denna metod är att kompressionsmodulen är linjärt beroende av rådande effektivspänning. Kompressionsmodulen utvärderas för var och en av återbelastningsgrenarna och relateras till effektivspän-

ningen vid respektive återbelastningsgrens början. Kompressionsmodulen plottas sedan mot effektivspänningen och en rät linje anpassas till försökspunkterna. Förutsatt att minst tre återbelastningsgrenar utförts så kan denna anpassning göras med hjälp av linjär regression. Den erhållna räta linjen har ekvationen

$$M = M_0 + k \cdot \sigma^- \quad (7.6)$$

där

M = kompressionsmodulen

M_0 = kompressionsmodulens värde vid $\sigma^- = 0$

k = en faktor som uttrycker modulens spänningsberoende

Erhållna värden på M_0 och k återges tillsammans med tillhörande värden på torrdensitet, packningsgrad och portal samt vattenkvot och vattenmättningsgrad, i tabell 7.11.

Tabell 7.11 M_0 (MPa) och k (MPa/kPa) erhållna ur ödometerförsök på laboratorie-inpackade provkroppar, vid olika vattenkvot och packningsgrad.

torr- dens. (t/m ³)	R_D (%)	portal	w (%)	S_r	M_0 (MPa)	k	M (MPa)	
							$\sigma^- = 100$	$\sigma^- = 200$
							(kPa)	
1.87	89.5	0.300	4.8	0.300	136.7	147	151.4	166.1
1.88	90.0	0.296	8.5	0.540	110.1	327	142.8	175.5
1.88	90.0	0.296	11.4	0.724	52.8	367	89.5	126.2
1.88	90.0	0.296	12.6	0.801	30.7	512	81.9	133.1
1.98	94.7	0.258	4.7	0.360	135.2	290	164.2	193.2
1.99	95.2	0.255	7.9	0.617	151.0	335	184.5	218.0
1.98	94.7	0.258	11.7	0.896	59.5	231	82.6	105.7

De värden som erhålles på kompressionsmodulen M ur "jungfru-kurvan" respektive återbelastningsgrenarna skiljer sig markant

från varandra. För naturlig lermorän hävdas, inte obefogat, att kompressionsmodulen skall utvärderas ur återbelastningsgrenarna, eftersom denna jordart för det mesta varit utsatt för betydande förbelastning genom landisen. Vad gäller fyllningar av lermorän så kan detta resonemang ej längre vara giltigt, eftersom jorden blir kraftigt omrörd under hanterandet, vilket förstör jordens naturliga konsolidering. Vid sättningsberäkningar i fyllning av lermorän bör därför inte kompressionsmodulen utvärderas ur återbelastningskurvan.

De värden på kompressionsmodulen som utvärderats från "jungfrukurvan" visar på vattenkvotens stora betydelse. Av värdena erhållna ur återbelastningsgrenarna att döma så ökar den negativa inverkan av ökande vattenkvot med ökad torrdensitet. Detta gäller dock inte de moduler som utvärderats ur "jungfrukurvorna" från de olika försöken. Denna brist i överensstämmelse vad avser vattenkvotens inverkan kan bero på att det vid försök på provkroppar med hög vattenkvot uppstår ett porgasövertryck i provkroppen längs "jungfrukurvan". Vid avlastning kommer därför en förhållandevis stor svällning att erhållas vilket ger lägre modul ur återbelastningsgrenen.

Den stora skillnaden mellan kompressionsmodulen utvärderad ur "jungfrukurvan" respektive en återbelastningsgren indikerar att statisk förbelastning av lermoränfyllningar bör vara en kraftfull metod att förbättra dessa fyllningars kompressionsegenskaper.

8 Hållfasthet och sättningar enligt fältundersökningar

8.1 Allmänt

Att uppskatta hållfasthet och kompressibilitet hos en fyllning av packad lermorän, på basis av laboratorieförsök, har visat sig besvärligt, Malmborg (1978). Den främsta anledningen till detta är förmodligen den stora skillnaden mellan packningsförfarandet i laboratorium och i fält. Vid tillverkning av provkroppar i laboratorium är det nödvändigt att före packning krossa ned alla jordklumpar i det helt torra materialet. Detta, tillsammans med packningsförfarandet (lager för lager), ger som resultat provkroppar med en homogenitet vida större än vad som uppnås i fält vid samma packningsgrad. Detta gäller speciellt vid packning på torra sidan, där de flesta packningsredskap, möjligtvis med undantag för fårfotsvälten, ej förmår bryta ned de mycket starka jordklumparna.

Det finns, mot bakgrunden ovan, anledning att söka klargöra hållfasthet och kompressibilitet direkt ur fältförsök.

I följande avsnitt görs jämförelser mellan sonderingsresultat och resultat från plattbelastningsförsöken erhållna vid försökslokalen Oxie.

8.2 Hållfasthetsbestämning

Två fältmetoder, spetstrycksondering och vingsondering, och deras förmåga att klargöra den odränerade hållfastheten, kommer att behandlas i följande avsnitt. Pressometermetoden som har teoretiska förutsättningar att vara lämplig i detta sammanhang har tyvärr måst lämnas utanför. Detta beror på att gränstrycket, som är den till hållfastheten kopplade storheten, inte varit möjlig att utvärdera från mer än ett fåtal försök.

Den storhet med vilka sonderingsresultaten jämförts är det kritiska grundtrycket utvärderat från plattbelastningsförsöken. Som kritiskt grundtryck har valts krypkurvans brytpunkt i tidsintervallet 8-16 min. De utvärderade kryptrycken framgår av tabell 8.1.

Tabell 8.1 Kryptryck utvärderade i tidsintervallet 8-16 min vid plattbelastningsförsök, Oxie.

försöksnummer	kryptryck (kPa)	medelvärde (kPa)
A: 21	415	
: 43	425	420
B: 22	615	
: 44	500	560
C: 19	290	
: 46	310	300
D: 21	170	
: 46	200	185
E: 22	115	
: 44	120	120
F: 22	600	
: 43	440	520

8.2.1 Trycksondering

Enligt Schmertmann (1978) kan den odränerade skjuvhållfastheten för lerjord utvärderas ur sambandet

$$\tau_{fu} = (q_c - g \cdot \rho \cdot z) / N_c \quad (8.1)$$

där

τ_{fu} = den odränerade skjuvhållfastheten (kPa)

q_c = spetstrycket (kPa)

g = tyngdaccelerationen (m/s^2)

z = djupet under markytan (m)

N_c = bärighetsfaktor

Om det finns ett linjärt förhållande mellan det kritiska grundtrycket q_k och den odränerade skjuvhållfastheten τ_{fu} så att

$$q_k = k \cdot \tau_{fu} \quad (8.2)$$

så kan ekv (8.1) omformas till

$$q_k / (k \cdot N_c) = q_c - g \cdot \rho \cdot z \quad (8.3)$$

Vid små sonderingsdjup kan termen $g \cdot \rho \cdot z$ försummas i förhållande till q_c , och ekv (8.3) kan skrivas

$$q_k = (k \cdot N_c) \cdot q_c \quad (8.4)$$

Enligt ekv (8. 4) kan således det kritiska grundtrycket beräknas genom att multiplicera spetstrycket q_c med en faktor $k \cdot N_c$. Genom att jämföra medelvärden av q_c för de olika försöksfälten med korresponderande värden på q_k så löses $k \cdot N_c$. I tabell 8.2 återges de på detta sätt beräknade värdena på $k \cdot N_c$.

Tabell 8.2 Faktorn $k \cdot N_c$ i ekv 8.4 utvärderad på basis av tabell 8.1 och 5.20-21.

försöksfält	$k \cdot N_c$
A (8v)	0.19
B (2v)	0.23
C (4t)	0.05
D (8t)	0.03
E (2t)	0.03
F (4v)	0.16

Av tabellen framgår klart att värdet på $k \cdot N_c$ är starkt beroende av om fyllningen våt- eller torrpäckats. För våtpackad fyllning är det kritiska grundtrycket ca 20 % av spetstrycket. I torrpäckad fyllning utgör det däremot endast 3-5 %. Denna stora skillnad mellan våt- och torrpäckad fyllning kan förklaras av två omständigheter, båda rörande den torrpäckade fyllningen.

Enligt Schmertmann (1978) är storleken på spetstrycket mycket känsligt för storleken på de horisontella spänningarna i jordprofilen. Möjligheten för förekomst av höga horisontella spänningar, uppkomna i samband med packningen, är förmodligen mycket större i torrpäckad än i våtpäckad fyllning. Skälet till detta är de stora skjuvdeformationer och därmed förknippade hävningar (runt välttrumman) som uppträder vid våtpackning. För en fyllning med fria ränder kan dessa horisontella spänningar mycket väl tänkas försvinna med tiden pga krypning. Detta kan ha inträffat i den undersökta fyllningen eftersom den har fria ränder. Dessutom utfördes spetstrycksonderingarna i direkt anslutning till fyllningens färdigställande medan plattbelastningsförsöken utfördes 1 år senare (detta tidsglapp var olyckligt men betingat av tillgängliga resurser).

Den andra möjliga förklaringen till det låga förhållandet mellan kritiskt grundtryck och spetstryck i torrpäckad fyllning baseras på strukturen. Vid torrpäckning erhålles ofta (och även i detta fall) en klumpformad struktur. Detta medför att hållfastheten blir starkt volymberoende*. På så sätt kommer den, vid plattbelastningsförsöken, verksamma hållfastheten att vara klart lägre än vid spetstrycksonderingen.

Den ena förklaringen utesluter inte den andra och förmodligen är de erhållna resultaten en effekt av båda.

Jämförelserna visar att spetstrycksondering kan användas för att ge en uppfattning om det kritiska grundtryckets storlek. För att tilltro skall kunna ställas till gjorda skattningar krävs dock kännedom om omständigheterna runt fyllningens utförande.

* se ex vis Hartleñ (1974)

8.2.2 Vingsondering

De för respektive försöksfält (A-F) erhållna medelvärdena på "skjuvhållfastheten" från vingsondering har i tabell 8.3 använts för att bilda kvoten q_k / τ_{fu} .

Tabell 8.3 Kryptryck enligt tabell 8.1 dividerat med "skjuvhållfasthet" enligt vingsond från tabell 5.17-18

försöksfält	q_k / τ_{fu}
A (8v)	2.4
B (2v)	3.2
C (4t)	1.8
D (8t)	1.1
E (2t)	1.2
F (4v)	2.7

I likhet med relationen spetstryck- kritiskt grundtryck så är relationen "skjuvhållfasthet"- kritiskt grundtryck starkt beroende av om fyllningen våt- eller torrpäckats. Dock är skillnaden i detta fall inte lika stor. För torrpäckad fyllning är det kritiska grundtrycket 1-2 ggr "skjuvhållfastheten" enligt vingsond. För våtpäckad fyllning är motsvarande relation 2.5-3. För det ideella fallet är relationen mellan skjuvhållfasthet och bärrighet lika med

$$N_c = 6.3$$

För våtpäckad fyllning är således relationen ungefär hälften av den ideella. Till del förklaras detta av att jämförelsen har skett med det kritiska grundtrycket och inte med bärrigheten. Förekomsten av mindre stenar i fyllningen bidrar dessutom säkert till att ge för höga värden vid vingsondering. Den vid vingsondering tvångsstyrda brottytan förklarar troligen till stor del den låga relationen mellan kritiskt grundtryck och "skjuvhållfasthet" i den torrpäckade fyllningen. Brottytan löper till stor del genom intakta klumpar och en

missvisande bild av den verksamma hållfastheten erhålles. Vid plattbelastningsförsöken sker rörelserna förmodligen utmed klumparnas kontaktytor medan de själva förblir tämligen intakta. Även om brottet vid vingsondering förutsättes ske under odränerade förhållanden så finns skäl att misstänka att de horisontella spänningarnas storlek har betydelse på samma sätt som vid spetstrycksondering.

Gjorda jämförelser visar att vingsondering med viss framgång kan användas för att bedömma kryptryckets storlek i packad lermorän, men då förutsättes kännedom om arbetsprocessen vid fyllningens utförande.

8.3 Sättningar

8.3.1 Trycksondering

Det finns i litteraturen ett antal olika ansatser till att utifrån resultatet från en sondering, bestämma sättningarnas storlek i olika jordarter, såsom sand, lera och organisk jord. Bland de ansatser som utnyttjar resultatet från en trycksondering kan nämnas Schmertmann's, De Beer's Meyerhof's och Sanglerat's. Dessutom kan Jaky's teori för spänningsfördelningen under en styv platta användas, Hansbo (1972). Uppgiften är att utifrån kännedom om hur fastheten, mätt som spetstryck, varierar med djupet, göra en numerisk integration över djupet av kvoten σ/M , dvs

$$s = \int (\sigma_i / M_i) * dz_i \quad (8.5)$$

Detta uttryck kan skrivas om så att σ_i utbytes mot q och ett influenstal I_i , varvid ekvationen får utseendet

$$s = q * \int (I_i / M_i) * dz_i \quad (8.6)$$

Om dessutom ansättes att modulen M är lika med spetstrycket multiplicerat med en faktor X , dvs

$$M = X * q_c \quad (8.7)$$

så erhålles

$$s = q/X * \int (y_i / q_{ci}) dz_i \quad (8.8)$$

Värden på X finns redovisade i intervallet 1.5 till 12. Den stora bredden på intervallet torde ha sin förklaring i att värdet på X är beroende av såväl jordart som den spänningsnivå vid vilket det utvärderats. Det är allmänt känt att förhållandet mellan grundtryck och sättning ej är linjärt,

utan så att ökande grundtryck ger upphov till successivt allt större sättningar. Enligt Schmertmann (1978) är det dessutom så att spetstrycket starkt påverkas av de horisontella spänningarna i jordprofilen.

Det normala användandet av ekv (8.8) innebär således att ett värde på X väljes, varefter sättningen beräknas med hjälp av ett eller flera trycksonderingsdiagram. I den fortsatta behandlingen i detta avsnitt kommer dock problemet att vara det omvända. Genom jämförelser med utförda plattbelastningsförsök kommer värden på X sökas så att verklig och med ekv (8.8) beräknad sättning överensstämmer vid varierande grundtryck.

I undersökningen har medtagits fyra olika ansatser för att beskriva spänningsspridningen i jorden. Dessa är Schmertmann's reviderade ansats, en på Jaky's teori grundad ansats samt den ofta använda 2:1-metoden. Dessutom ingår en av författaren framtagen ansats.

Schmertmann's ansats

Schmertmann har vid olika tidpunkter presenterat två ansatser för att ur trycksonderingsdiagram göra en sättningsberäkning. Ansatserna har det gemensamt att de anger en töjningsfunktion som beror av djupet, z , och som, för cirkulära och kvadratiska fundament, vid ett djup under fundamentet motsvarande dubbla plattbredden är lika med noll. Största skillnaden mellan ansatserna utgörs av influenstalets storlek, som är beroende av grundtryckets storlek i den senare men ej i den ursprungliga ansatsen. Eftersom endast den reviderade ansatsen ingår i jämförelsen så redovisas inte den ursprungliga närmare.

Den reviderade ansatsen kan matematiskt formuleras enligt nedan

$$I(z) = 0.1 + 2 \cdot z \cdot (I_{zp} - 0.1) / B \quad \text{för} \quad 0 < z < B/2 \quad (8.9)$$

$$I(z) = 2 \cdot I_{zp} \cdot (2 - z/B) / 3 \quad \text{för} \quad B/2 < z < 2 \cdot B \quad (8.10)$$

där

$$I_{zp} = 0.5 + 0.1 \cdot (q_n / q_p)^{0.5} \quad (8.11)$$

övriga storheter framgår av fig 8.1.

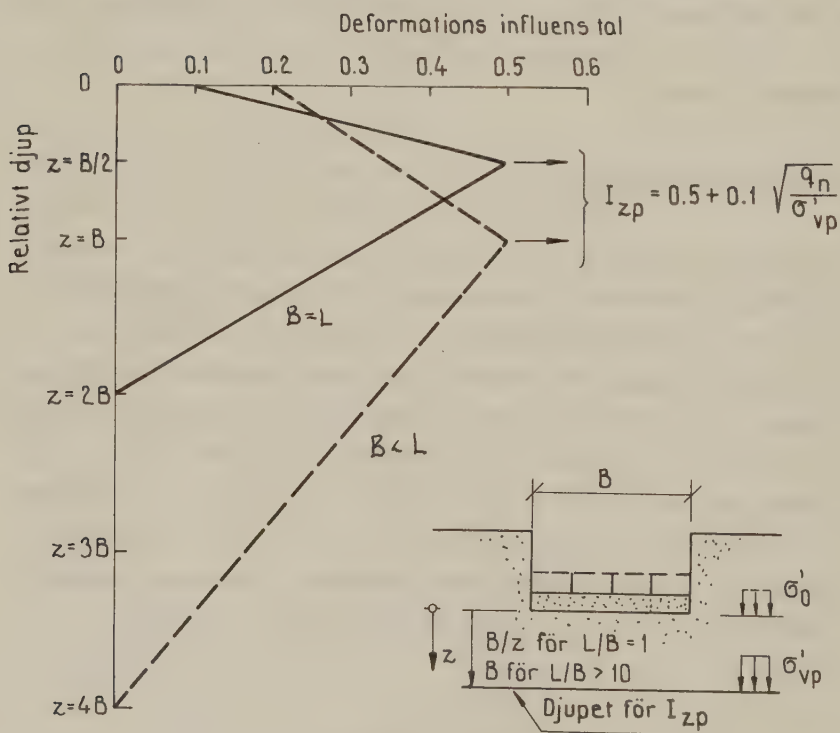


FIG 8.1 Töjningsfördelning under en platta.
(efter Schmertman)

Jaky's ansats

En ofta använd metod för att bedömma sättningars storlek under plattor och fundament är att utnyttja det av Jaky föreslagna sambandet, som för cirkulära och kvadratiska fundament kan skrivas

$$s = q \cdot D / (2 \cdot M) \quad (8.12)$$

Detta samband grundar sig på en spänningsfördelning enligt fig 8.2, vilket matematiskt kan formuleras

$$I(z) = 1 - z/B \quad \text{för } 0 < z < B \quad (8.13)$$

så att

$$q(z) = I(z) \cdot q$$

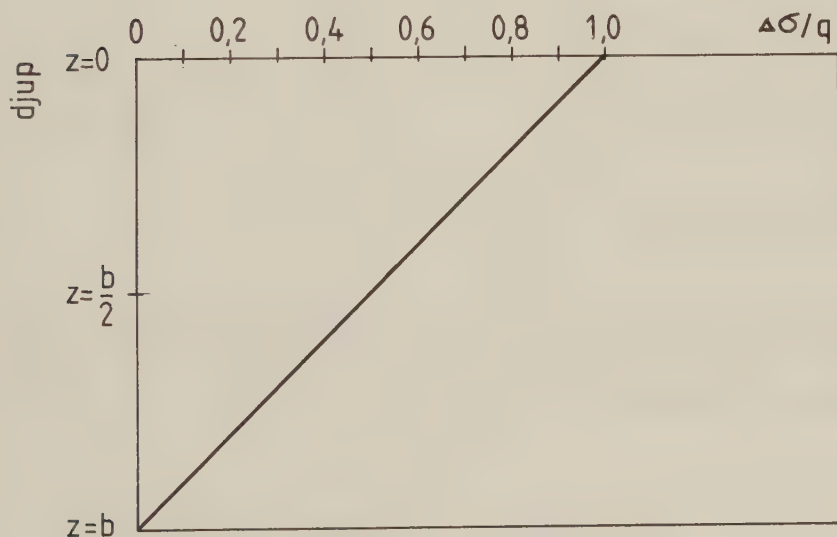


FIG 8.2 Spänningsfördelning under en platta.
(efter Jaky)

2:1-metoden

En i praktiken ofta använd metod för att beräkna spännings-spridningen med djupet är 2: 1-metoden. Dess popularitet är främst en frukt av dess enkelhet i kombination med dess relativt goda överensstämmelse med den elasticitetsteoretiska lösningen. Matematiskt kan den för ett kvadratisk fundament formuleras

$$q(z) = q/(1+z/B)^2 \quad (8.14)$$

Om kvoten $1/(1+z/B)^2$ ritas upp som funktion av z/B så erhålles fig 8.3.

Vid de beräkningar som ligger till grund för de resultat som redovisas i detta avsnitt har den kontinuerliga kurvan ersatts med tre rätta linjer, vilka har ekvationerna

$$I(z) = 1 - 1.12 * z/B \quad (8.15)$$

$$I(z) = 0.63 - 0.38 * z/B \quad (8.16)$$

$$I(z) = 0.39 - 0.14 * z/B \quad (8.17)$$

där

$$I(z) = q(z)/q$$

Denna approximation med rätta linjer ger genomgående något för höga värden. Den erhållna överskattningen torde dock sakna praktisk betydelse.

Författarens ansats

Författarens ansats grundar sig inte på några djupgående teoretiska överväganden, utan är snarare ett konglomerat av Schmertmann's och Jaky's ansatser. Från Schmertmann har storleken på det influerade djupet tagits och är således lika med 2 ggr plattbredden. Från Jaky har influensfunktionens enkla utseende (en triangel) hämtats. Dock har författaren ändrat dess värde från 1 till 0.5 i fundamentets underkant, fig 8.3. Detta medför att för en modul, M , som är konstant med djupet så kan fortfarande ekv (8.12) användas. Matematiskt kan således ansatsen tecknas

$$I(z) = 0.5 - z/(2 \cdot B) \quad \text{för } 0 < z < 2 \cdot B \quad (8.18)$$

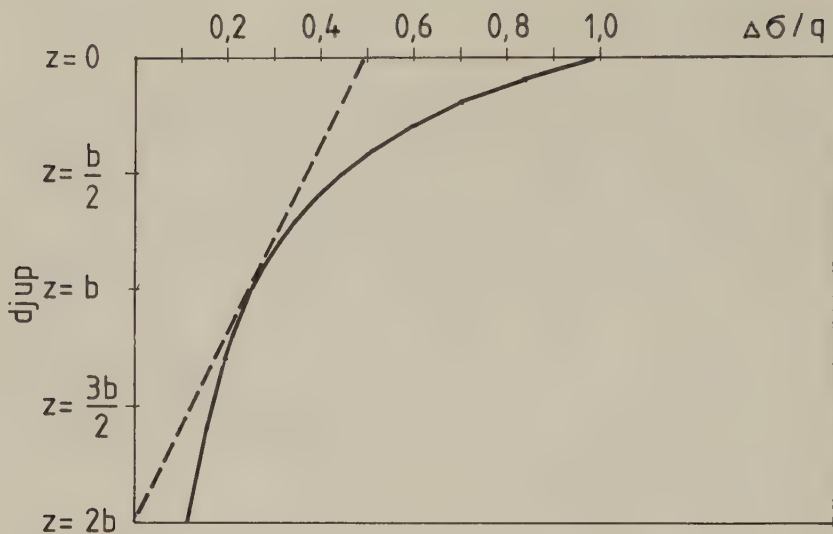


FIG 8.3 Spänningsfördelning under plattmitt
enligt 2:1-metoden, —————

Spänningsfördelning enligt
Malmborg — — — —

Analys

Eftersom mängden försöksdata från Oxie var tämligen stor, 30 spetstrycksonderingar och 12 plattbelastningsförsök, togs ett datorprogram fram med vars hjälp alla numeriska beräkningar utfördes.

Programmet utför först den numeriska integrationen av kvoten σ / M för var och en av de fyra ansatserna. Detta gjordes för var och en av de 30 sonderingarna. Resultatet av denna fas i beräkningarna var fyra stycken tal, ett tal för var och en av de fyra ansatserna. För Schmertmann's ansats erhöles dock ett tal för varje aktuellt värde på grundtrycket (eftersom I_{zp} beror av grundtrycket). Dessa tal utgjorde den del av ekv (8.8) som står till höger om summa-tecknet. Genom att multiplicera talet med ett grundtryck q , och sätta den på så sätt, som funktion av X , erhållna sättningen lika med verklig sättning erhållen ur plattbelastningsförsök vid aktuellt grundtryck q , så kunde X bestämmas. På var och ett av de 6 fälten, A-F, mellan vilka packningsarbete och vattenkvot varierats, har 5 sonderingar och 2 plattbelastningsförsök utförts. Detta innebär att inom var och ett av de 6 fälten kan 10 jämförelser göras eller totalt 60. Eftersom varje jämförelse är gjord vid minst 5 och ofta 8 olika värden på grundtrycket skulle en redovisning av X -värdena i tabellform bli svåröverskådlig. Därför har valts att redovisa dessa i diagram där X -värdet plottats mot grundtrycket för olika behandlingar (packningsarbete vattenkvot) och ansatser för spänningsfördelningen, fig 8.4.

Det mest påtagliga beträffande X -värdet är dess starka spänningsberoende. Det är därför viktigt att vid angivandet av ett X -värde samtidigt ange dess giltighetsområde. Det ur plattgrundläggningssynpunkt intressanta spänningsintervallet är 100 till 400 kPa. Schmertmann's ansats ger dock inte samma starka spänningsberoende hos X -värdet som övriga ansatser. Detta är

naturligt med tanke på att grundtryckets storlek påverkar influenstalets storlek i Schmertmann's ansats.

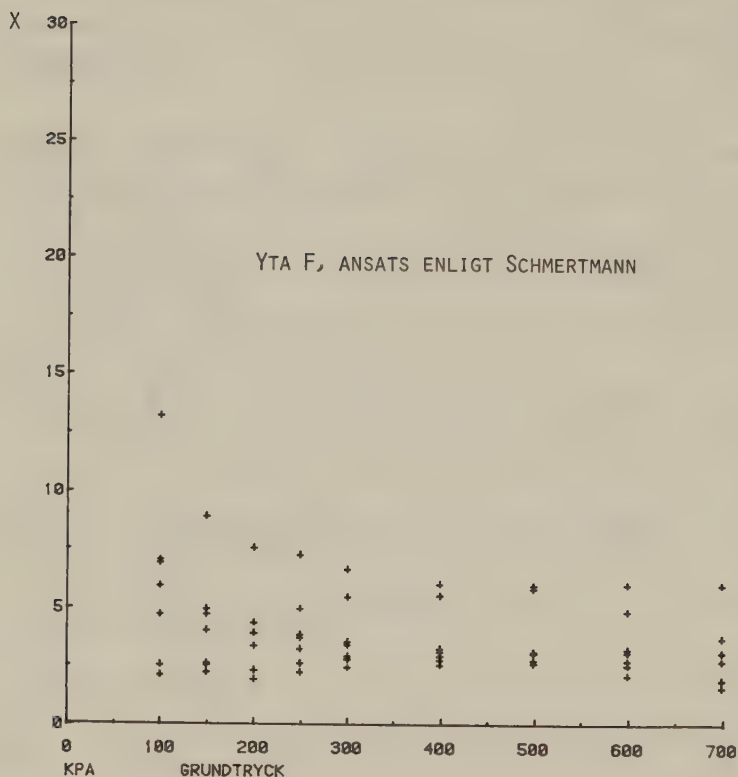


FIG 8.4 Faktorn X i ekv 8.7 som funktion av grundtryck i, med 4 vältöverfarter, våtpackad fyllning. Schmertman's ansats. Övriga resultat återfinnes i bilaga K 8.

Vid en rent visuell jämförelse av X-värdets spridning vid olika ansatser på spännings- och därmed töjningsfördelning står det klart att någon generell regularitet ej föreligger. En indelning av X-värdena i värden erhållna i våt- respektive torrpackad fyllning synes dock ge vissa generella samband. I våtpackad fyllning ger författarens och Jaky's ansatser genomgående den minsta spridningen vilket skulle innebära att dessa

ansatser bäst beskriver deformationsfördelningen för våtpackad fyllning.

I torrpäckad fyllning visar det sig att Jaky's ansats ger den minsta spridningen. Det är dock värt att notera den exceptionellt lilla spridning som erhållits med 2:1-metoden som ansats på försöksfält D, vilket är torrpäckat med 8 överfarter. X-värdena har för respektive grundtryck grupperat sig i två väldefinierade grupper. De två grupperna hänför sig till vart och ett av de två plattbelastningsförsöken. På samma sätt ger författarens ansats en mycket liten spridning på försöksfält A, vilket är våtpäckat med 8 vältöverfarter. Det är uppenbart, och på intet sätt överraskande, att spridningen avtar med ökat packningsarbete.

Slutligen avtar spridningen med ökat grundtryck.

Eftersom det i föregående avsnitt konstaterats att författarens ansats gav minst spridning i våtpäckad fyllning och Jaky's minst i torrpäckad, så bör någon av dessa väljas för utvärderingen av X-värdenas medelvärden. Av egocentriska skäl väljes därför författarens egen ansats för såväl torr- som våtpäckad fyllning. Detta medför att X-värdena är direkt jämförbara mellan våt- och torrpäckad fyllning. I våtpäckad fyllning varierar medelvärdet av X enligt tabell 8.4.

Tabell 8.4 Faktorn X i ekv 8.7 erhållen i våtpackad fyllning, genom jämförelser av vid plattbelastningsförsök erhållna sättningar med sättningar beräknade utifrån spetstrycksondering med ekv 8.8, och 8.18.

Försöksfält	Grundtryck		Sättningskvot
	100 kPa	400 kPa	
B	14	7	0.29
F	11	5	0.34 *
A	5	4	0.30 *

* medelvärden av 4 sonderingar istället för 5.

Tabell 8.4 visar att med ökat packningsarbete minskar X . Detta skulle kunna innebära att en ökning i packningsarbete resulterar i en större ökning i spetsmotstånd än vad som motsvarar minskningen i kompressibilitet vid plattbelastningsförsöken. Detta stämmer inte med den av Schmertmann (1978) framförda åsikten att sättningsbenägenheten i en packad jord är mindre än vad som återspeglas i spetstrycket. Den sista kolumnen i tabell 8.4 visar hur sättningskvoten, $\sum I(z) / q_c$, varierar med mängden packningsarbete. Denna kvot visar sig öka vid en ökning av packningsarbetet från 2 till 4 vältöverfarter men avtar sedan vid en ökning från 4 till 8. Ett lågt värde på sättningskvoten innebär ett liten förväntad sättning baserat på trycksonderingsresultat. Vad tabell 8.4 egentligen visar är därför att skillnaderna i kompressibilitet mellan fälten B, F och A är större än vad trycksonderingsresultaten ger anledning att misstänka. Om skillnaderna i kompressibilitet vid plattbelastningsförsöken helt skulle avspeglats i trycksonderingsresultaten så skulle X -värdet varit detsamma för samtliga fält.

I torrpäckad fyllning varierar medelvärdet av X enligt tabell 8.5.

Tabell 8.5 Faktorn X i ekv 8.7 erhållen i torrpäckad fyllning, genom jämförelser av vid plattbelastningsförsök erhållna sättningar med sättningar beräknade utifrån spetstrycksondering med ekv 8.8 och 8.18.

Försöksfält	Grundtryck		Sättningskvot
	100 kPa	400 kPa	
E	8	2	0.33
C	10	5	0.34 *
D	11	2.5	0.26

* medelvärde av 4 trycksonderingar istället för 5.

Till skillnad från (i) den våtpackade fyllningen uppvisar X-värdet här en liten men dock ökning med ökande packningsarbete. Samtidigt minskar sättningskvoten, vilket är rimligt för ett ökande packningsarbete. Försöksfälten är likvärdiga vad avser X-värdet men skillnader finns i sättningskvot. Detta förhållande medför att god korrelation mellan ökat spetstryck och sättning vid plattbelastning råder i torrpäckad fyllning.

Av ovan gjorda jämförelser framgår att förhållandet mellan erhållet spetsmotstånd vid spetstrycksondering och uppmätt kompressibilitet vid plattbelastningsförsök är starkt beroende av grundtryckets storlek och om fyllningen är våt- eller torrpäckad.

Om det inte är känt huruvida en fyllning skall räknas som våt- eller torrpäckad bör X-värdet väljas till 5 a⁻⁶ vid låga grundtryck (100 kPa) och 2 a⁻³ vid höga (400 kPa). Med större kännedom om förutsättningarna eller omständigheterna runt själva fyllningsarbetena kan troligtvis distinktare värden på X väljas.

8.3.2 Vingsondering

Ett i litteraturen ofta redovisat och utnyttjat förhållande mellan en naturlig jords elasticitetsmodul och dess odränerade skjuvhållfasthet är

$$E = (250-500) \tau_{fu} \quad (8.19)$$

Detta motsvarar att kompressionsmodulen kan skrivas som

$$M = (500-1000) \tau_{fu} \quad (8.20)$$

om tvärkontraktionstalet sätts till 0.4.

I kap 5 hävdades att det är oegentligt att tolka det från vingsondering i silt- eller lermorän erhållna värdet som den odränerade skjuvhållfastheten. Värdets storlek bör dock vara kopplat till jordens fasthet varför en bedömning av jordens kompressibilitet utifrån detta fasthetsvärde är tänkbar.

Med tanke på att Jakymodulen erhållen vid plattbelastningsförsöken är av storleksordningen 3-30 MPa, beroende av bl a vid vilken spänningsnivå den utvärderats, så inses snabbt att en ansats som

$$M = 500 \cdot FV \quad (8.21)$$

där

$FV =$ fastheten enligt vingsond (beräknad på samma sätt som τ_{fu})

ger mycket för höga värden på kompressionsmodulen. I medeltal skulle kompressionsmodulen för de olika försöksfälten uträknade med ekvation (8.21) bli enligt tabell 8.6. I tabellen är, för jämförelsens skull även medtaget de ur plattbelastningsförsöken framräknade värdena på Jakymodulen vid 150 och 250 kPa grundtryck.

Tabell 8.6 Kompressionsmodulen utvärderad ur vingsondering enligt ekv 8.21, och Jakymodulen ur plattbelastningsförsök.

försöks- fält	M ur ving- sond (MPa)	M ur plattbelastningsförsök (MPa)	
		q = 150 kPa	q = 250 kPa
A (8v)	88	5.3	4.5
B (2v)	89	13.0	10.0
C (4t)	84	6.8	5.2
D (8t)	87	10.7	5.8
E (2t)	50	4.3	2.3
F (4v)	97	8.3	6.2

Av tabell 8.6 framgår först och främst att skillnaderna i Jakymodul enligt plattbelastningsförsöken, mellan fälten A, B, C och D ej framgår av vingsonderingen. Den enda avvikelse som vingsonderingen förmått att avslöja är de låga modulerna på fält E. När dessutom de ur vingsonderingarna beräknade modulerna är 8 till 20 ggr för stora, jämfört med de som erhållits vid plattbelastningsförsöken, så innebär detta att moduluppskattningar baserade på vingsondsvärden ej bör förekomma i fyllningar av silt- eller lermorän.

Om det vore möjligt att på ett korrekt sätt ta hänsyn till volymsberoendet vid vingsondering, så skulle förmodligen kompressionsmodulen bättre kunna beräknas.

8.3.3 Viktsondering

Som tidigare nämnts finns inget direkt teoretiskt samband mellan jords hållfasthet eller kompressibilitet och det motstånd jorden utövar mot indriften av spetsen vid viktsondering, speciellt med tanke på det sätt som motståndet mäts. Mot denna bakgrund inses svårigheten att ens formulera ett empiriskt samband.

Viktsondering är sina svagheter till trots den i Sverige vanligaste sonderingstypen. En relation mellan antal halvvarv och jordens kompressionsegenskaper vore därför säkert önskvärd. I nästa avsnitt behandlas därför en jämförelse mellan spetsmotståndet vid spetstrycksondering och antal halvvarv vid viktsondering.

För att jämförelsen skulle ske med likvärdiga parametrar så integrerades spetstryckkurvan numeriskt, med hjälp av dator, över intervall om 0.2 m. Det framintegrerade värdet delades därefter med intervallbredden, varvid ett medelvärde av spetsmotståndet erhöles för varje 0.2 m intervall. På så sätt erhöles en parameter jämförbar med den som erhöles vid viktsondering.

Genom att i ett diagram plotta antal halvvarv angivet som ett medeltal av de 30 viktsonderingarna i Oxie, nivå för nivå ned genom fyllningen mot korresponderande medelvärden på spetstrycket (de 30 spetstrycksonderingarna i Oxie) erhöles det visuella sambandet som återges i fig 8.5. Det bör understrykas att varje punkt i diagrammet baseras på vardera 30 vikt- och spetstrycksonderingar, under varierande betingelser vad avser packningsarbete och vattenkvot vid packningen.

En linjär regression av försökspunkterna gav sambandet

$$q_c = 1.60 + 0.175hv : r^2 = 0.92 : 5 < hv < 25 \quad (8.22)$$

eller annorlunda uttryckt

$$hv = -7.26 + 5.24q_c : 2 < q_c < 6 \quad (8.23)$$

där

q_c = spetsmotståndet (MPa)

hv = antal halvvarv för 0.2 m sjunkning

Ur ekvation (8.22) kan således ett ekvivalent spetstryck beräknas utifrån antalet halvvarv vid viktsondering.

Under avsnittet 8.3.1 rekommenderades användandet av ett X-värde mellan 3 och 6, så att

$$M = X \cdot q_c \quad (8.24)$$

Med hjälp av ekvation (8.22) och (8.24) kan således kompressionsmodulen beräknas enligt

$$M = 4 \cdot (1.60 + 0.175 \cdot hv) : 5 < hv < 25 \quad (8.25)$$

För antal halvvarv lika med 15 så erhålles $M=17$ MPa och för $hv = 5$, $M= 10$ MPa. Ekvation (8.25) ger förmodligen för höga värden på M vid låga värden på hv varför viss försiktighet förordas.

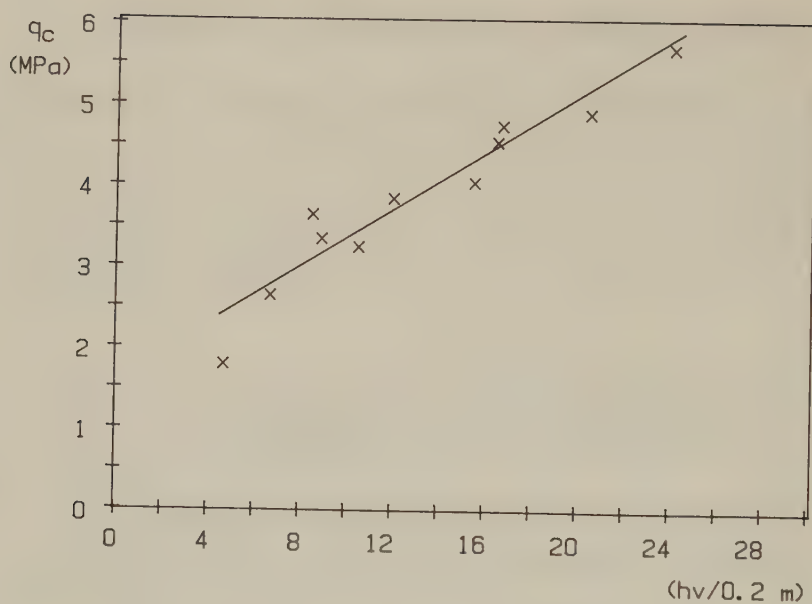


FIG 8.5 Spetstrycket q_c , som funktion av antalet halvvarv vid viktsondering. Diagrammet är upprättat på basis av tabell 5.14-5.15 och 5.22-5.23.

8.3.4 Pressometerförsök

Ménard och Rousseau (1962) föreslog en semiempirisk formel som, med pressometermodulen som ingångsvärde, kan användas för sättningsuppskattningar av ytligt grundlagda plattor i homogen jord. Den totala sättningen delas efter sin orsak upp i två delar. Den första delen avser den kompression som uppkommer genom de skjuvdeformationer som äger rum och tecknas

$$s_d = \frac{2}{9} E_m \cdot q \cdot B_0 \left(1 + \frac{B}{B_0} \right)^{\alpha} \quad (8.26)$$

där

s_d = av skjuvdeformationer orsakad sättning

E_m = pressometermodul

q = nettogrundtryck

B_0 = referensbredd

B = aktuell fundamentbredd

l_d = formfaktor

α = reologisk faktor som beror av jordart och förhållandet mellan pressometermodul E_m och nettogränstryck p_1

Formelns andra del avser att motsvara den deformation som inträffar omedelbart under fundamentet genom att jorden konsoliderar.

Denna del tecknas

$$s_c = \left(\alpha / 9 E_m \right) \cdot q \cdot l_c \cdot B_c \quad (8.27)$$

där

s_c = konsolideringssättning

l_c = formfaktor

Den totala sättningen erhålles genom att summera dessa båda bidrag. För att formeln skall vara giltig krävs dock att $B > B_0 = 0.6 \text{ m}$ samt att $q^- > q_1^-/10$. Dessutom skall det erhållna sättningsbeloppet multipliceras med en faktor $(1.2 - 0.2D/B)$ för de fall då $D < B$.

Den av Menard och Rousseau angivna formeln modifierades och en beräkningsmetodik presenterades, för att användas i heterogen jord, av Centre d'Etudes Menard 1967.

Den heterogena jorden under fundamentet delas in i 16 skikt var och ett med tjockleken $B/2$.

Den totala sättningen för fundamentet kan då tecknas

$$s = \frac{2}{9E_d} q^- B_0 \left(1 + \frac{B}{B_0}\right)^\alpha + \alpha \frac{1}{9E_c} q^- \frac{1}{c} B \quad (8.28)$$

där

$$E_d = \frac{4}{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{(0.85 \cdot E_2)} + \frac{1}{E_{345}} + \frac{1}{(2.5 \cdot E_{678})} + \frac{1}{(2.5 \cdot E_{9-16})}\right)} \quad (8.29)$$

och

$$E_c = E_1 \quad (8.30)$$

Med uttrycksättet E_{345} avses det harmoniska medelvärde av pressometermodulerna i skikten 3, 4 och 5. Att E_c sätts lika med E_1 grundas på elasticitetsteori vilken säger att konsolideringssättningarna företrädesvis inträffar omedelbart under fundamentet dvs i skikt 1.

Av ekvation (8.28) inses att sättningen är linjärt beroende av nettogrundtrycket q^- varför ekvation (8.28) med fördel istället kan skrivas på formen

$$s = q^- \left(\frac{2}{9E_d} B_0 \left(1 + \frac{B}{B_0}\right)^\alpha + \alpha \frac{1}{9E_c} \frac{1}{c} B \right) \quad (8.31)$$

Sättningen kan alltså uttryckas som nettogrundtrycket q' multiplicerat med en konstant vars värde beror av fundamentets storlek och form samt underliggande jords pressometermodul. Bestämmandet av "konstanten" (termerna innanför yttre parentesen) är förknippat med numeriskt omständliga och tidsödande beräkningar, varför detta med fördel låter sig göras mha dator.

Då det inom projektet, vid försökslokalen Oxie, utförts 30 pressometerprofiler, var och en omfattande 5 nivåer, fann författaren det motiverat att utveckla ett datorprogram för sättningsberäkning i heterogen jord baserat på ekv (8.31). Programmet beräknar värdet av "konstanten" inom den yttre parentesen i ekvation (8.31) för ett valfritt fundament. För ytterligare information om programmet hänvisas till Malmberg (1982).

Den reologiska faktorn α har vid beräkningarna valts till 1/2. Det ur programmet erhållna värdet på "konstanten" används sedan för att beräkna sättningen med sambandet

$$s = q \cdot k \quad (8.32)$$

där

s = sättning i m

q = nettogrundtryck i kPa

k = "konstant"

Enligt Jaky kan sättningen för ett cirkulärt fundament tecknas

$$s = q \cdot D / 2 \cdot M \quad (8.33)$$

En jämförelse av ekvationerna (8.32) och (8.33) visar att konstanten k i ekv (8.32) motsvaras av $D/2M$ i ekv (8.33). Konstanten k borde därför kunna jämföras med kompressionsmodulen M förutsatt att den inverteras och multipliceras med halva fundamentbredden.

Mot denna jämförelse kan anföras att enligt Jaky medräknas sättningar som inträffar intill ett djup av 1 plattbredd under fundamentet, men enligt ekvation (8.31) medtages bidrag ned till ett djup av 8 plattbredder. En analys av ekvation (8.29) visar att för ett konstant värde på pressometermodulen E_m , så bidrar skikten 3 till 16 med 30-35 % av totalsättningen, dvs 70 % av totalsättningen inträffar inom djupet 1 plattbredd från fundamentets underkant.

Tabell 8.7 Sättningar på basis av pressometerförsök omräknade till Jakymoduler enligt ekv 8.32 -33.

Sättningsstorlekar ur pressometerförsök redovisade som Jakymoduler		
Försöksfält	M-medel (MPa)	Variationskoefficient s / M-medel
A (8v)	4.06	29.8
B (2v)	2.94	38.1
C (4t)	1.33	29.3
D (8t)	2.68	20.9
E (2t)	1.32	6.5
F (4v)	4.72	13.4

Enligt pressometerförsöken är de våtpackade fyllningsytorna genomgående mindre sättningsbenägna än de torrpäckade med samma packningsarbete. De minsta beräkningsmässiga sättningarna erhålles på försöksfält F. Fält A uppvisar den näst minsta sättningsbenägenheten. De största beräknade sättningarna erhålles på försöksfälten C och E vilka båda är torrpäckade.

Den odiskutabelt lägsta variationskoefficienten har erhållits på fält E, vilket är förvånande då den är torrpäckad med endast 2 överfarter. Ett litet packningsarbete skulle rimligtvis resultera i en förhållandevis stor spridning, vilket stämmer för fält B som är våtpackat med 2 överfarter och där

den största variationskoefficienten erhållits. Någon generell tendens vad avser de framräknade modulernas variationskoefficient är således ej möjlig att utläsa.

En jämförelse av de ur pressometerförsöken beräknade sättningarna, med de erhållna vid plattbelastningsförsöken, visar att pressometern överskattar sättningarna i det i praktiken intressanta spänningsintervallet (100 till 400 kPa). I tabell 8.8 visas en jämförelse mellan Jakymoduler erhållna vid plattbelastningsförsök respektive pressometerförsök. Ur tabellen kan utläsas att Jakymodulen ur pressometerförsök stämmer förhållandevis väl med Jakymodulen utvärderad vid 400 kPa grundtryck ur plattbelastningsförsöken. Det är endast på fälten B och C som den ur plattbelastningsförsöken vid 400 kPa grundtryck utvärderade Jakymodulen, avsevärt överskrider den från pressometerförsöken.

Tabell 8.8 Jämförelse mellan Jakymoduler på basis av pressometerförsök, tabell 8.7, med Jakymoduler erhållna vid plattbelastningsförsök tabell 5.37-38.

Försöksfält	Medelmodul ur platt- belastningsförsök (MPa)			Medelmodul ur pressometerförsök (MPa)
	Grundtryck (kPa)			
	100	250	400	
A	6.5	4.5	4.2	4.1
B	17.4	10.0	8.5	2.9
C	9.7	5.2	3.5	1.3
D	15.1	5.8	3.0	2.7
E	7.6	2.3	1.5 *	1.3
F	11.6	6.2	5.3	4.7

* endast 1 värde

Vid lägre värden på grundtrycket erhålles i allmänhet en kraftig överskattning av sättningarna vid beräkning ur pressometerförsök. Vid ex vis 250 kPa i grundtryck varierar överskattningen mellan 10 och 300 %. Till del kan denna överskattning förklaras av att den sättning som erhålles med ekvation (8.31) är den förväntade 10 års sättningen, medan sättningen vid plattbelastningsförsöken erhållits inom loppet av 32 min. Sättningsberäkningar baserade på pressometerresultat kan sägas vara en relativt bra metod för att erhålla en övre gräns för sättningarnas storlek vid måttliga grundtryck.

8.3.5 Skjuvvågshastighet

Skjuvvågshastigheten i ett elastiskt isotropt oändligt medium kan tecknas med hjälp av mediets skjuvmodul och dess densitet enligt

$$v_s = \sqrt{G/\rho} \quad (8.34)$$

Denna ekvation kan även skrivas

$$G = \rho \cdot v_s^2 \quad (8.35)$$

dvs med mediets densitet och skjuvvågshastighet känd så kan skjuvmodulen beräknas. De välkända samband som råder mellan ett mediums elastiska storheter såsom elasticitetsmodul, tvärkontraktionstal, kompressionsmodul och skjuvmodul med flera, gör det möjligt att ur skjuvvågshastigheten även erhålla en uppfattning om ex vis elasticitetsmodul och kompressionsmodul.

$$M = 2 \cdot G \cdot (1 - \nu) / (1 - 2 \nu) \quad (8.36)$$

In situ bestämningarna av skjuvvågshastigheten kan teoretiskt sett därför användas för att bestämma kompressionsmodulens storlek, förutsatt att tvärkontraktionstalet är känt eller kan uppskattas. I jorddynamiska sammanhang utnyttjas ofta följande värden.

$\nu = 1/3$ för friktionsjord

$\nu = 0.4$ för lerjord

Med $\nu = 1/3$ erhålles ur ekv (8.36)

$$M = 4 \cdot G \quad (8.37)$$

och

$$M = 6 \cdot G \quad (8.38)$$

för $\nu = 0.4$.

I en blandjord som silt- eller lermorän kan diskuteras vilket värde på n som är det mest relevanta. I den fortsatta behandlingen kommer dock sambandet som ges av ekvation (8.38) att användas, dvs $\nu = 0.4$.

Tabell 8.9 Skjuvmodulens medelvärde utvärderad ur skjuvvågshastigheten mätt vinkelrätt mot och parallellt med vältriktningen, för de olika försöksfälten, A-F.

Försöksfält	Riktning	Skikt					
		1	2	3	4	5	6
		S k j u v m o d u l (MPa)					
A (8v)	par	93	210	412	624	242	142
	vin	79	229	74	222	158	404
B (2v)	par	132	312	567	127	214	164
	vin	63	137	180	297	180	117
C (4t)	par	181	370	95	96	536	288
	vin	272	94	183	106	182	251
D (8t)	par	52	130	215	1165	197	122
	vin	74	617	217	1908	809	230
E (2t)	par	88	137	334	1059	253	298
	vin	106	60	147	758	2363	198
F (4v)	par	196	154	183	115	295	106
	vin	90	123	80	133	162	214

De i tabell 8.9 angivna värdena på skjuvmodulen är beräknade med följande värden på densiteten för de olika försöksfälten,

$$\begin{aligned}
 A &= 1.99 \text{ t/m}^3 \\
 B &= 1.97 \text{ t/m}^3 \\
 C &= 1.96 \text{ t/m}^3 \\
 D &= 2.00 \text{ t/m}^3 \\
 E &= 1.95 \text{ t/m}^3 \\
 F &= 1.95 \text{ t/m}^3
 \end{aligned}$$

Som framgår av tabell 8.9 är variationen i skjuvmodul mycket stor både vad avser variationen mellan olika skikt i ett och samma försöksfält, samt mellan skjuvmoduler, bestämda parallellt med respektive vinkelrätt mot vältriktningen, i en och samma punkt. Förutom att variationen är mycket stor så är vär-

dena i allmänhet mycket höga. Det högst beräknade värdet på skjuvmodulen är $G = 2360$ MPa, vilket motsvarar en kompressionsmodul $M = 14180$ MPa. Det lägsta framräknade värdet på skjuvmodulen $G = 52$ MPa, ger $M = 310$ MPa. Att värdena är avsevärt högre än de moduler som kunnat beräknats utifrån ex vis spetstrycksondering och pressometer är naturligt, med tanke på att dessa moduler bestämts vid skjuvdeformationer som är flera 10 potenser högre än de deformationer som skjuvvågen ger upphov till.

Andreasson (1979) redovisar försök med skjuvmodulbestämningar på högplastisk lös lera. Hans resultat visar att skjuvmodulen minskar med en faktor 3-5 vid en ökning av skjuvdeformationen från 10^{-3} % till 1 %.

I stora drag kan sägas att de kompressionsmoduler som räknats fram utifrån skjuvvågshastighetsbestämningar är en faktor 100 till 4000 ggr större än de moduler som erhållits ur statiska försök. Dessa stora skillnader kan inte enbart förklaras med skillnader i deformationsstorlek. Skillnaderna är så stora att de gav upphov till misstanke om att något systematiskt fel begåtts i samband med försökens genomförande eller vid utvärderingen. Något sådant fel har dock ej kunnat påvisas.

Den stora avvikelsen mellan ovannämnda moduler i kombination med den stora spridningen i, ur skjuvvågshastighetsbestämningarna framräknade moduler, gör att författaren bedömer denna typ av mätning som föga lämplig eller värdefull.

8.3.6 Fallviktförsök

De ur fallviktförsöken framräknade sekantmodulerna måste för att vara jämförbara med modulerna från plattbelastningsförsöken multipliceras med faktorn 0.5 eftersom sekantmodulerna vid fallviktsförsöken beräknats som

$$M = q/(s/D) \quad (8.39)$$

medan modulen från plattbelastningsförsöken framräknats ur

$$M = q/(2*s/D) \quad (8.40)$$

där

M = modul (MPa)

q = grundtryck (MPa)

s = sättning (m)

D = plattdiameter (m)

I tabell 8.10 har denna korrektion av modulerna från fallviktsförsöken genomförts. Det mest uppseendeväckande i jämförelsen av dessa moduler är att de faktiskt är av samma storleksordning. Detta är inte helt väntat med tanke på den stora skillnaden i belastningshastighet mellan försökstyperna. För att uppnå ex vis spänningen 400 kPa åtgår vid plattbelastningsförsöken ca 4 h eller 14000 till 15000 s. Motsvarande tid är vid fallviktförsöken ca 0.5 s, vilket är en faktor $3 \cdot 10^4$ ggr snabbare.

Tabell 8.10 Jämförelse mellan kompressionsmodulen ur fallviktsförsök, (på basis av tabell 5.17-18) och Jakymodulen erhållen ur plattbelastningsförsök, tabell 5.37-38.

försöks- fält	försöks- typ	grundtryck (kPa)		
		200	400	600
A (8v)	fv	3.9	3.8	---
	pb	4.8	4.2	3.9
B (2v)	fv	5.1	5.8	5.9
	pb	11.1	8.5	6.6
C (4t)	fv	4.3	5.6	6.6
	pb	5.9	3.5	---
D (8t)	fv	3.9	4.9	5.0
	pb	7.9	3.0	---
E (2t)	fv	3.5	3.8	---
	pb	2.9	1.5	---
F (4v)	fv	4.4	5.6	6.8
	pb	6.5	5.3	4.3
fv= fallviktsförsök				
pb= plattbelastningsförsök				
--- spänningen ej uppnådd				

Även om modulerna visat sig vara av samma storleksordning föreligger en väsentlig skillnad vad avser deras spänningsberoende. Fallviktsförsöken ger genomgående moduler som ökar med ökad spänning i intervallet 200 till 600 kPa, under det att förhållandet är det rakt motsatta vid plattbelastningsförsöken. Således underskattas modulen vid låga grundtryck och överskattas vid höga, då den beräknas utifrån fallviktsförsök.

Om modulerna erhållna vid 400 kPa grundtryck under plattbelastningsförsöken på de olika fälten, ordnas från den största till den minsta så erhålles följande ordning

B, F, A, C, D och E.

Görs detsamma med modulerna från fallviktförsöken så erhålles

B, F, C, D, A och E.

Spearman's rangkorrelationskoefficient blir

$$r_s = 0.83$$

Den relativa ordningen mellan försöksfälten är som synes densamma i de båda fallen, med ett undantag. Undantaget utgörs av försöksfält A som vid fallviktförsöken uppvisar lägre moduler relativt C och D än vad som är fallet vid plattbelastningsförsöken. Förklaringen till denna relativa avvikelse är förmodligen inte att fallviktförsöken ger för låga värden på försöksfält A utan snarare att de ger för höga värden på fälten C, D och E. Stöd för denna förklaring erhålles, åtminstone till del, genom tabell 8.11, där kvoten M_{fv}/M_{pb} återges för de olika försöksfälten vid grundtrycken 200 och 400 kPa.

Tabell 8.11 Jämförelser mellan Jakymoduler erhållna vid fallvikts- respektive plattbelastningsförsök, för de olika försöksfälten A-F.

försöksfält		grundtryck (kPa)	
		200	400
A	(8v)	0.81	0.90
B	(2v)	0.46	0.68
C	(4t)	0.73	1.60
D	(8t)	0.49	1.63
E	(2t)	1.21	2.53
F	(4v)	0.68	1.06

Vid plattbelastningsförsöken på fält C, D och E erhöles en kollaps vid ett visst grundtryck. För högre grundtryck än detta erhöles stora vertikala deformationer i jorden under plattan. Detta s k kollapsgrundtryck var vid samtliga försök lägre än 400 kPa.

Vid fallviktförsöken erhöles kollaps endast undantagsvis vilket kan vara en effekt av den mycket snabba belastningsökningen. En möjlig förklaring kan vara att den absoluta eller relativa jordförflyttning (skjuvbrott respektive stansbrott) som är en förutsättning för kollapsen, helt enkelt ej hinner äga rum.

Vid jämförelsen mellan de statiska plattbelastningsförsöken och de dynamiska fallviktsförsöken får ej bortses från att dessa två försökstyper påverkar olika stor jordvolym. Om djupverkan för båda försökstyperna antages till 2 ggr plattdiametern så påverkas jordlager ned till ett djup av 0.5 m vid fallviktsförsöken och 1.4 m vid plattbelastningsförsöken. Trots denna skillnad, synes fallviktsförsök vara en förhållandevis god metod för att bestämma en lermöränfyllnings kompressionsegenskaper i spänningsintervallet 200 till 400 kPa. Detta under förutsättning att plattbelastningsför-

söken kan anses ge det "sanna" värdet på kompressions-egenskaperna.

Den genomförda försöksserien är relativt liten, varför några generella slutsatser om fallviktmeterens användbarhet som kontrollmetod vid fyllningsarbeten, ej är möjliga. Metoden har dock sådana kvaliteter att den bör ha en framtid. Den är snabb och relativt enkel att utföra, förutsatt att tillgång finns till ett fordon som kan lyfta och släppa vikten. Till denna uppgift bör det vara möjligt att utnyttja de idag allt vanligare borrhagnarna om de kompletteras med viss specialutrustning.

De inom projektet utförda fallviktförsöken registrerades i fält och bearbetades därefter i en stationär minidator. Om metoden skall bli praktiskt användbar skall såväl registrering som bearbetning ske direkt i fält så att resultatet föreligger inom den tidsrymd som åtgår för att förbereda utrustningen för nästa försök, dvs 2 till 5 min. Detta bör vara fullt möjligt att uppnå genom användandet av en fältdator vilken sköter såväl registrering som bearbetning.

Genom att låta datorn beräkna kompressionsmodulen ex vis enligt Jaky

$$M = q \cdot D / (2 \cdot s)$$

så erhålles en storhet väl lämpad att utnyttja som kontrollparameter. Vilken nivå som väljes på kontrollparametern för godkännande kan lätt anpassas till rådande förutsättningar.

En förutsättning för ett utbrett användande av fallviktmeteren är dock att såväl utrustning som försöksutförande standardiseras efter det att mer ingående studier av metoden kommit till stånd.

9 Jämförelser mellan compactometer och några fältmetoder

I detta kapitel görs jämförelser mellan å ena sidan cmv (compactometervärdet) och å andra sidan

- torrdensitet enligt standard volymeter
- vattenkvot
- spetstryck enligt spetstrycksond
- antal hv/0.2 m vid viktsondering
- fasthet enligt vingsond
- skjuvvågshastigheten

Då det endast är i torrpackad fyllning som något egentligt utslag erhöles på compactometern, så inskränker sig jämförelserna av naturliga skäl till gälla för denna fyllning. Jämförelsen är gjord skiktvis, vilket innebär att cmv för vart och ett av de 6 torrpackade skikten jämförts med värden erhållna i dessa 6 skikt med övriga i jämförelsen ingående metoder. Samtliga använda värden är hämtade ur kap 5, där tabeller med klassmedelvärden redovisats. Det innebär att varje punkt som redovisas i de efterföljande diagrammen är baserade på 36 cmv-värden och 15 observationer av den, i respektive diagram, mot cmv avsatta storheten.

9.1 Torrdensitet

Som framgår av fig 9.1 råder inget påtagligt samband mellan uppmätt torrdensitet och erhållet cmv. Det bör poängteras att variationen i torrdensitet är liten, vilket tyder på att cmv ej är unikt kopplad till torrdensiteten i finkornig jord.

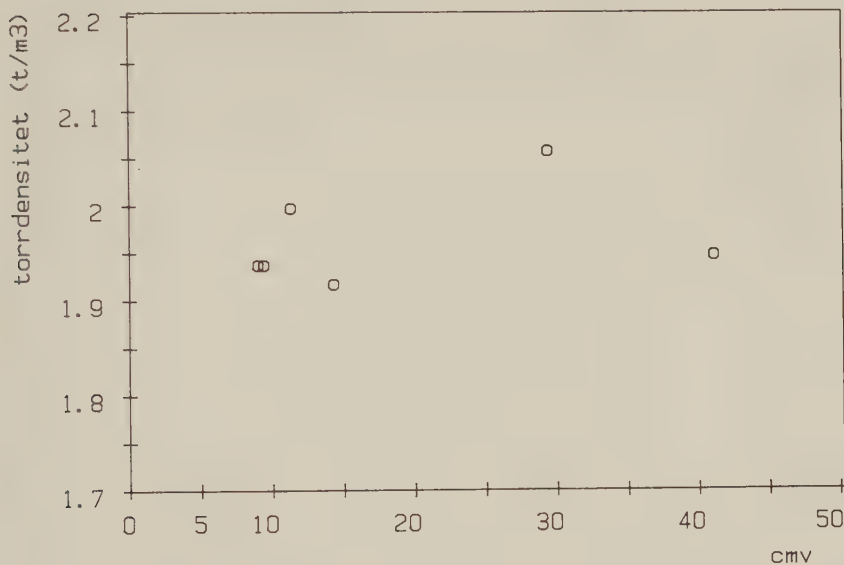


FIG 9.1 Samband mellan torrdensitet och cmv.

9.2 Vattenkvot

I likhet med för torrdensiteten saknas en stark koppling till cmv. En tendens till, med ökande cmv, avtagande vattenkvot indikeras. Detta är rimligt med tanke på att kompressionsmodulen visat sig minska med ökande vattenkvot.

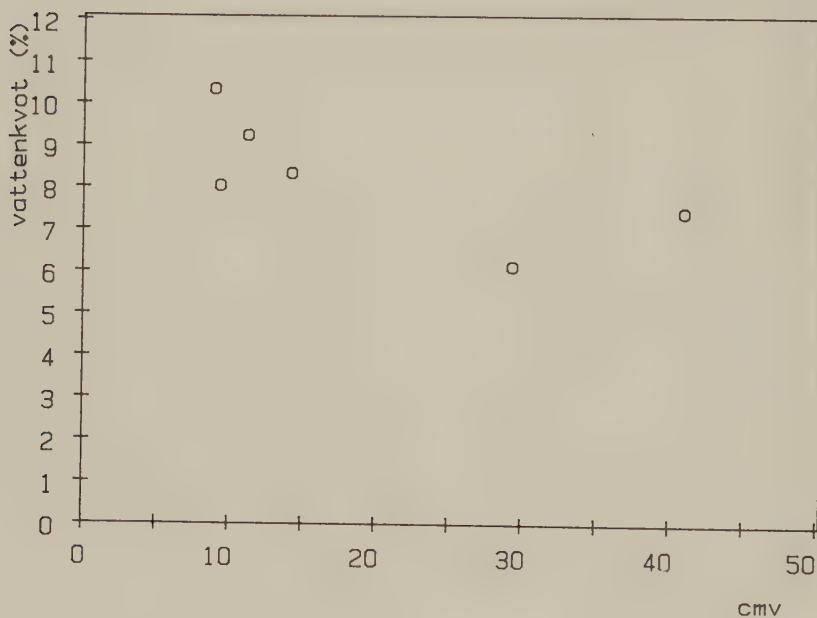


FIG 9.2 Samband mellan vattenkvot och cmv.

9.3 Spetstrycksondering

Av fig 9.3 a framgår att ett mycket märkligt samband tycks råda mellan uppmätt spetstryck och erhållet cmv. En tänkt kurva, dragen genom försökspunkterna får ett spiralliknande utseende. Ett sådant beroende är osannolikt. Om cmv, i aktuellt skikt, istället jämföres med spetstrycket i närmast föregående skikt så erhålles fig 9.2 b. Det på så sätt erhållna sambandet styrker den i kap 5 framförda uppfattningen att cmv starkt påverkas, inte bara av aktuellt skikt, utan även av underliggande.

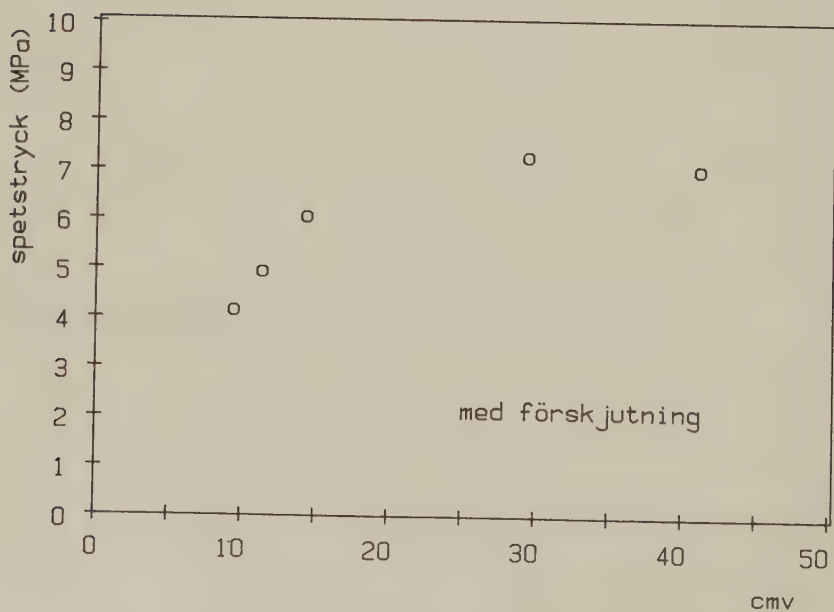
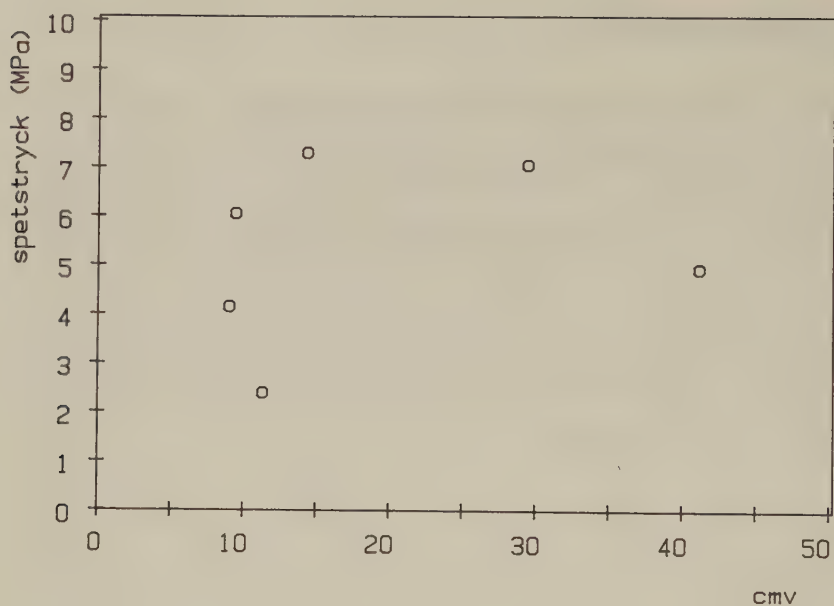


FIG 9.3 Samband mellan spetstryck och cmv
a, utan förskjutning mellan skikten
b, med förskjutning mellan skikten

9.4 Viktsondering

Sambandet mellan antal hv/0.2 m och cmv liknar mycket sambandet mellan spetstryck och cmv. Detta är naturligt med tanke på det samband som redovisats i avsnitt 8.2.2 mellan spetstryck och hv/0.2 m. En förskjutning av skikten från vilka cmv respektive hv/0.2 m hämtats skulle därför här ge samma effekt.

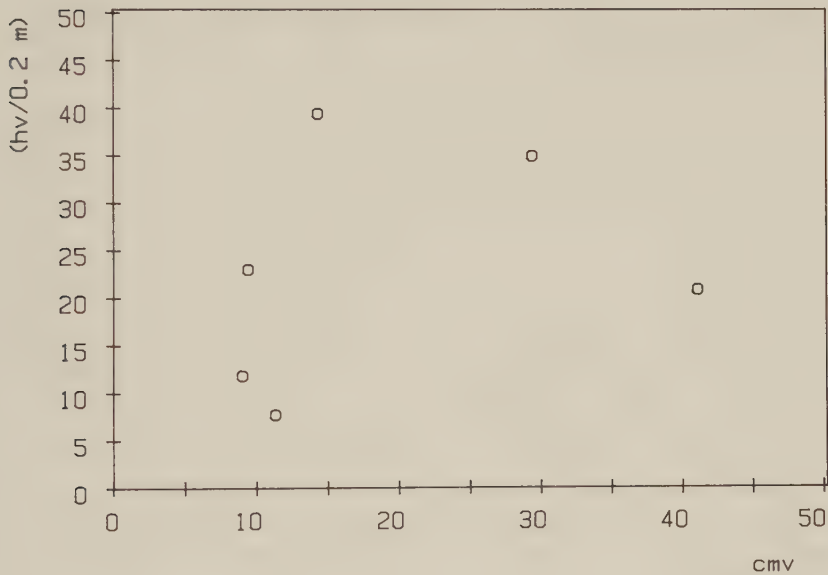


FIG 9.4 Samband mellan antal hv/0.2 m och cmv.

9.5 Vingsondering

Då vingsondering ej utförts i det översta skiktet så innehåller fig 9.5 endast 5 punkter. Av dessa 5 ligger 4 tämligen välordnat. I det skikt där det högsta cmv erhållits har samtidigt det lägsta värdet erhållits med vingsonden. Förklaringen till detta står delvis att finna i de låga vingsondsvärden som erhöles inom fält E. Fält E torrpäckades med 2 vältöverfarter och gav höga värden på cmv, se 5.2.3.

Påpekas bör att spannet för fasthetsvariationen enligt vingsond är relativt litet.

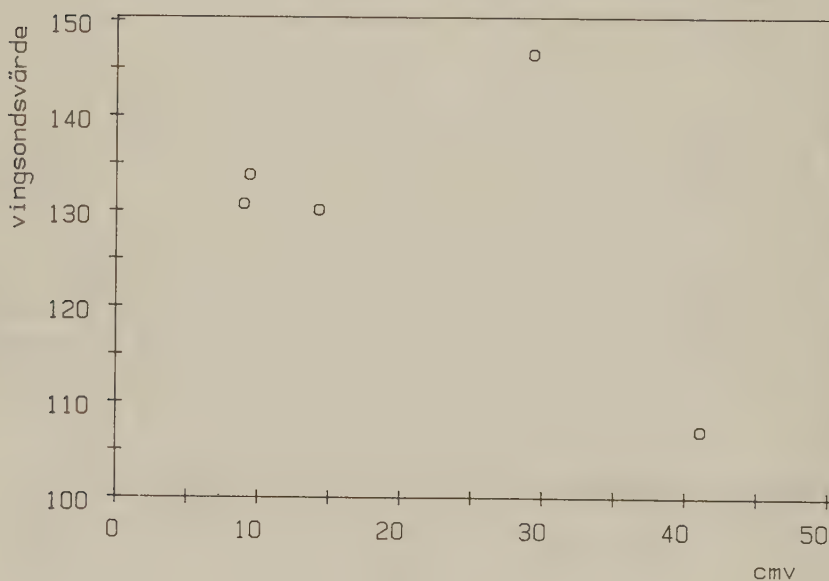


FIG 9.5 Samband mellan fasthet enligt vingsond och cmv.

9.6 Skjuvvågshastighet

Som framgår av fig 9.6 erhålles ett relativt starkt samband mellan cmv och skjuvvågshastigheten. Om, den i avsnitt 9.3 gjorda, förskjutningen mellan cmv och spetstryck är riktig, kan den starka kopplingen enligt 9.6 tolkas så att även skjuvvågshastigheten till sin storlek påverkas av underliggande skikt.

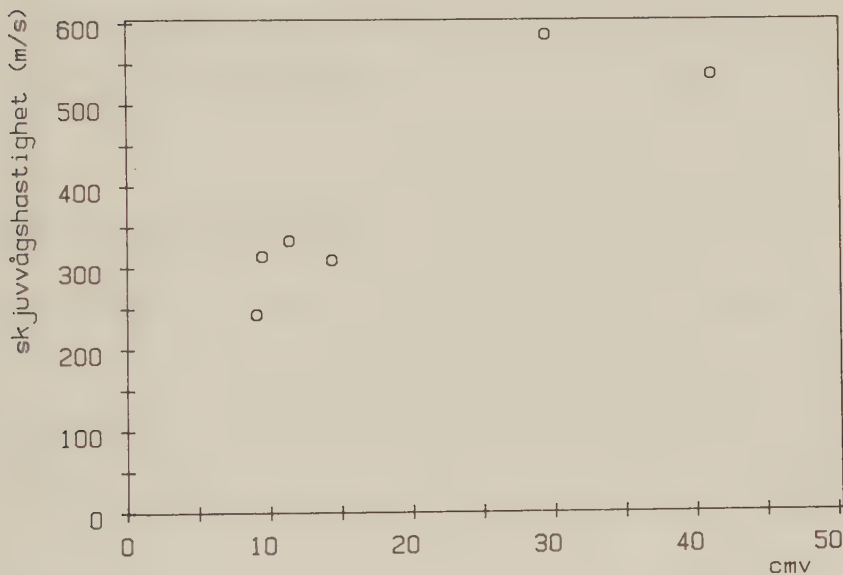


FIG 9.6 Samband mellan skjuvvågshastighet och cmv.

9.7 Slutsatser

Sammanfattningsvis kan om cmv-värdets koppling till andra storheter konstateras, att denna är starkast till de storheter som återspeglar fyllningens fasthet. Speciellt stark blir denna koppling när hänsyn tas till compactometerns "djupverkan".

10 Slutsatser och rekommendationer

10.1 Slutsatser

De i laboratorium genomförda undersökningarna på inpackade silt- och lermoräner visar:

Såväl den odränerade som den dränerade skjuvhållfastheten är starkt beroende av vattenkvot vid packningen samt uppnådd torrdensitet. Detsamma gäller för kompressibiliteten.

Odränerad skjuvhållfasthet

Den odränerade skjuvhållfastheten ökar med ökande lerhalt men skillnaden är liten vid vattenkvoter som väsentligt överskrider den optimala. Vid 10 % lerhalt erhålles den högsta odränerade skjuvhållfastheten i närheten av optimal vattenkvot. Vid 20 % lerhalt ökar skjuvhållfastheten genomgående med minskande vattenkvot.

Dränerad skjuvhållfasthet

De dränerade hållfasthetsparametrarna är starkt beroende av vattenkvot och deformationsgrad. Torrdensiteten samt spänningvägen till brott har även stor betydelse.

Vid standard-triaxialförsök, erhålles vid låg lerhalt ett residualvärde på kohesionen av 25-30 kPa oberoende av om materialet våt- eller torrpakats. Vid 20 % lerhalt är motsvarande värde 55-65 kPa.

Vid liten deformation (1-2 %) beror kohesionens storlek starkt av om materialet våt- eller torrpäckats. Vid våtpackning är kohesionens storlek oberoende av deformationens storlek. Vid torrpäckning och 10 % lerhalt är kohesionen 50-60 kPa. Vid 20 % lerhalt är motsvarande värde 150-200 kPa.

Friktionsvinkeln utvecklas snabbt med deformationen för torrpäckt material, oavsett lerhalt. Vid ca 10 % deformation är den ca 38° . För våtpäckt material utvecklas friktionsvinkeln långsammare, och uppgår vid 14 % deformation till ca 65 % av värdet för torrpäckt material.

Spänningsvägen till brott visar sig ha stor betydelse för storleken på de dränerade hållfasthetsparametrarna. Utvärderad kohesion varierar starkt mellan olika försökstyper vid torrpäckning, fig 6.9. Vid våtpäckning tycks dock spänningsvägen sakna betydelse, och kohesionen är då 50-60 kPa.

Friktionsvinkelns storlek påverkas också av spänningsvägen. Speciellt erhålles mycket låga värden vid passiva försök på våtpäckt material.

Det erhållna beroendet av spänningsvägen kan förklaras av de skillnader i struktur som erhålles vid torr- respektive våtpäckning.

Kompressibilitet

Den ur ödometerförsök utvärderade kompressionsmodulen, M , påverkas starkt av vattenkvot, torrdensitet och lerhalt.

Vid 10 % lerhalt påverkas kompressibiliteten främst av torrdensiteten, så att en ökad torrdensitet ger en ökande kompressionsmodul. Skillnaden i kompressibilitet mellan torra och våta sidan är störst vid låga värden på torrdensiteten.

Vid 20 % lerhalt påverkas kompressibiliteten framförallt av vattenkvoten. På torra sidan är kompressionsmodulen ungefär 10 ggr större än på den våta. Skillnaden i kompressionsmodul mellan torrdensiteter motsvarande 90 respektive 95 % packningsgrad är försumbar på torra sidan. På våta sidan fördubblas kompressionsmodulen vid motsvarande ökning av packningsgraden.

Det bör understrykas att resultat erhållna genom laboratorieförsök ej är direkt överförbara till fältförhållanden. Detta beror förmodligen på att den struktur som erhålles vid laboratoriepackning skiljer sig från den som erhålles i fält. Den stora nedbrytning av materialet som är nödvändig för att laboratiemässigt kunna packa jorden, resulterar i en homogen makrostruktur. Vid fältmässig packning erhålles, framförallt vid låga vattenkvoter, en makrostruktur uppbyggd av fasta jordklumpar. De hållfasthets- och kompressionsegenskaper som utvärderas ur laboratorieförsök, är snarare representativa för naturlig än för packad lermorän.

De i fält utförda undersökningarna visar:

Plattbelastningsförsök

Vid 20 % lerhalt och hög vattenkvot ($w_{opt} + 7\%$ -enheter) erhålles låga kryptryck och relativt låga kompressionsmoduler.

Vid 10 % lerhalt och relativt hög vattenkvot ($w_{opt} + 3\%$ -enheter) erhöles kryptryck som varierar mellan 400 och 550 kPa, beroende på mängden packningsarbete. De högsta kryptrycken erhöles för det lägsta packningsarbetet och vice versa. Samma tendens erhöles för kompressibiliteten.

Vid vattenkvoter runt optimum ($w_{opt} + 0.5\%$ -enheter) varierade kryptrycken mellan 120 och 300 kPa. Det lägsta kryptrycket erhöles för det minsta packningsarbetet. Detsamma gällde kompressionsmodulen, vilken för övrigt var hög för låga grundtryck, men sjönk kraftigt med ökande grundtryck.

Densitetsbestämningar

Den ofta använda, Vägverkets vattenvolymeter, ger i dessa sammanhang otillfredställande stor spridning. Dessutom är en kontroll baserad på enbart densiteten otillräcklig, med tanke på vattenkvotens betydelse. Trots att stora skillnader erhöles mellan de olika försöksfälten vid Oxie-lokalen, vad gäller kryptryck och kompressibilitet, så har inte större skillnader i uppmätt torrdensitet än 1.95-2.00 t/m³ erhöles.

Spetstrycksondering

Det erhölesna spetstrycket visade sig vara starkt beroende av såväl vattenkvot som packningsarbete. Vid torrpäckning erhöles i allmänhet spetstryck som var dubbelt så stora som vid våtpäckning. Vid såväl torr- som våtpäckning erhöles de högsta spetstrycken vid 4 vältöverfarter (2, 4 och 8 vältöverfarter

ingick i undersökningen). Vid våtpackning erhöles det lägsta spetstrycket vid 8 vältöverfarter.

Storleken på de sättningar som erhöles vid plattbelastningsförsöken kunde beräknas med hjälp av spetstryckkurvan.

Viktsondering

En stark koppling erhöles mellan spetstrycket och antalet hv/0.2 m sjunkning vid viktsondering. Det är därför möjligt att beräkna uppkomna sättningar vid plattbelastning, med hjälp av viktsond. En förutsättning är dock att extremt höga viktsondmotstånd ej medräknas.

Vingsondering

Vingsonden kan i lermöränfyllningar ej användas för att bestämma kompressionsmodulen. Däremot kunde den med viss framgång användas för uppskattningar av kryptrycket, erhållet vid plattbelastning.

Pressometerförsök

I allmänhet var det svårt att erhålla något tillförlitligt värde på gränstrycket ur pressometerförsök. De ur pressometerförsöken utvärderade pressometermodulerna kunde däremot med framgång användas för sättningsberäkningar, enligt den av Baguelin et al (1978) redovisade metoden.

Skjuvvågshastighet

Den metod som vid försökslokalen Oxie användes för skjuvvågshastighetsbestämningar visade sig olämplig som kontrollmetod. De ur skjuvvågshastigheterna beräknade modulerna varierade kraftigt, samtidigt som värdena blev så höga att något systematiskt fel i mätningarna befarades. Något sådant fel kunde vid en kontroll dock ej påvisas.

Fallviktsförsök

God överensstämmelse mellan de moduler som bestämts med fallvikt- respektive plattbelastningsförsök erhöles vilket är något förvånande. Metoden behöver dock vidareutvecklas och standardiseras innan den kan tas i allmänt bruk.

Compactometer

Vid vattenkvoter runt den optimala erhöles efter 8 vältöversfarter i medeltal 23 enheters utslag. Maximalt erhöles utslag upp till 40 enheter.

Mycket tyder på att cmv i dessa jordar, och med de relativt små lagertjocklekarna (0.3 m), starkt påverkas av egenskaperna i närmast föregående skikt. Denna inverkan tycks starkare än inverkan från det skikt som samtidigt packas, fig 9.3.

Vid vattenkvoter som med ca 3 % -enheter överskrider den optimala erhöles inget relevant värde med compactometern.

Kunskapen om hur cmv byggs upp i dessa jordar behöver ytterligare belysas innan compactometern kan användas allmänt, i finkorniga jordar.

10.2 Rekommendationer

Utförande

Vid låga lerhalter i fyllningsmaterialet bör packning vid låga vattenkvoter undvikas, såvida inte mycket kraftfulla packningsredskap användes. Förmår packningsredskapet ej slå sönder klumparna finns risk för att en kollapsande struktur erhålles. Denna risk är förmodligen avsevärt mindre vid höga lerhalter. Anledningen till denna skillnad, är skillnaden i såväl odränerad som dränerad hållfasthet vid låga vattenkvoter, för lerrik och lerbattig morän. Den lerrika moränen bör packas vid så låg vattenkvot som möjligt. Det är även då viktigt att använda tillräckligt effektiva packningsredskap, vilket innebär tunga vibrerande får- eller padfotsvältar.

Vid våtpackning bör istället en viss försiktighet iakttas vid packningen. Ett alltför omfattande packningsarbete resulterar förmodligen endast i en stor omrörning, och därmed nedbrytning av materialets naturliga hållfasthet. Därav följer att användandet av fordon med mycket höga marktryck bör ifrågasättas vid våtpackning.

Utförandekontroll

Utförandekontrollen bör ägnas speciell uppmärksamhet. Fyllningsmassornas packbarhet bör kontinuerligt undersökas. I detta sammanhang kan den i kap 3.5 omnämnda MCV-metoden vara ett utmärkt hjälpmedel. Att använda fordonens framkomlighetsförmåga som kriterium på när arbetena bör avbrytas för att låta fyllningsmassorna torka upp, kan möjligtvis vara tillämpligt i lerbattiga moräner. Är lerhalten 20 % och högre finns risk för att ett sådant kriterium ger dåliga fyllningar, dvs alltför våta fyllningar. Som övre gränsvärde på vattenkvoten kan 0.4-0.5 ggr flytgränsen användas. Det högre värdet gäller för lerbattiga moräner.

Resultatkontroll

Vid resultatkontrollen bör någon av följande metoder användas

- spetstrycksondering
- pressometerförsök
- viktsondering

Som kontrollkriterium kan ex vis den beräkningsmässiga sättningen för en cirkulär platta, med diametern $D=1.0$ m, användas.

Vid spetstrycksondering sättes

$$M = 4 \cdot q_c$$

vid grundtryck i intervallet 100-300 kPa. Sättningsberäkningen göres med fördel enligt Jaky, se 8.3.1.

Vid användandet av pressometer beräknas sättningen enligt den av Baguelin et al (1978) angivna metoden.

Vid viktsondering kan antalet $hv/0.2$ m räknas om till ett spetstryck enligt

$$q_c = 1.60 + 0.175 \cdot hv \quad ; \quad 5 < hv < 25$$

där

$$q_c = \text{spetstrycket (MPa)}$$

hv = antalet halvvarv för 0.2 m sjunkning

För större motstånd än 25 $hv/0.2$ m sjunkning användes spetstryckets värde för $hv = 25$. Därefter beräknas sättningen på samma sätt som vid spetstrycksondering.

Resultatkontrollen bör ges sådan omfattning, och bedrivs på sådant sätt, att någon av de, i kap 3.5, angivna metoderna kan tillämpas. Detta är viktigt med tanke på den spridning som erhålles i resultaten.

Tillåtna grundtryck

Tillåtna grundtryck väljes med hänsyn till storleken på tillåtna sättningar. Dessa kan beräknas enligt ovan. Dock måste, speciellt vid torrpackad fyllning, kontrolleras att grundtrycken ej överskrider halva kryptrycket. För att bedömma kryptryckets (q_k) storlek vid plattbelastning kan antingen spetstryck- eller vingsondering användas.

Vid spetstrycksondering gäller att

$$q_k = 0.2 \cdot q_c \quad \text{i våtpackad fyllning}$$

och

$$q_k = 0.05 \cdot q_c \quad \text{i torrpackad fyllning}$$

där

$$q_k = \text{kritiskt grundtryck vid plattbelastning (MPa)}$$

$$q_c = \text{spetstryck vid spetstrycksondering (MPa)}$$

Vid vingsondering gäller att

$$q_k = 2.5 \cdot \tau_{fu} \quad \text{i våtpackad fyllning}$$

och

$$q_k = \tau_{fu} \quad \text{i torrpackad fyllning}$$

där

$$q_k = \text{kritiskt grundtryck vid plattbelastning (kPa)}$$

$$\tau_{fu} = \text{"skjuvhållfasthet enligt vingsond (kPa)}$$

11 Litteratur

Ahmed, S., Lovell, C.W. & Diamond, S., Pore Size and Strength of Compacted Clay. American Society of Civil Engineers, New York, 1974, (Vol 100, No. GT4).

Ahrentzen, P., Differences between non-calcareous and calcareous moraine clay. Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Paris, 1980, (proc. International conference on compaction), s 7-10.

Andersson, L. & Bjurek, H., Vattenkvotens och torrdensitetens inverkan på packad moränleras egenskaper. Tekniska Högskolan i Lund, avdelningen för geoteknik, 1977, (TVGT-5001).

Andreasson, B., Deformation Characteristics of Soft, High Plastic Clays under Dynamic Loading Conditions. Chalmers Tekniska Högskola, institutionen för geoteknik med grundläggning, Göteborg, 1979.

Baguelin, F., Jezequel, J.F. & Shields, D.H., The Pressure-meter and Foundation Engineering. Trans Tech Publications, Schweiz, 1978.

Barden, L., The Effect of Stress Path on the Compression of Compacted Clay Fill. Symposium on Earth and Rock-Fill Dams, India, 1968.

Bell, J.R., Compaction Energy Relationships of Cohesive Soils. Transportation Research Record; 641, 1977.

Bergdahl, U., Fogelström, R., Larsson, K-G. & Liljekvist, P.,
Förebyggande av sättningar i ledningsgravar - en förstudie.
Statens geotekniska institut, Linköping, 1979. (No 7)

Bergdahl, U., Bestämning av jordegenskaper med sondering -
En litteraturstudie. Statens geotekniska institut, Linköping,
1983, (kommer att utges i SGI:s rapportserie).

Berggren, B., Grävpålar på friktionsjord - sättningar och
bärförmåga. Chalmers Tekniska Högskola, institutionen för
geoteknik med grundläggning, Göteborg, 1981.

Blom, G., Tabeller över statistiska fördelningar. Student-
litteratur, Lund, 1969.

Blom, G., Statistiktsteori med tillämpningar. Studentlitteratur,
Lund, 1970.

Broms, B. & Forssblad, L., Classification of Soils with
Reference to Compaction. Statens geotekniska institut, Stock-
holm, 1968, (Särtryck och prel. rapporter No. 29).

Busk, G., 4. Grundläggning med platta eller sula vid husbygg-
nadsarbeten - ingår i Grundläggningsarbeten. Ingenjörsläroverket,
Stockholm, 1975, s 57-74.

Carlsson, A., Pressometer - Program för utvärdering av presso-
meterförsök med hjälp av dator. Tekniska Högskolan i Lund, avdel-
ningen för geoteknik, 1981, (TVGT-5006).

Charles, J.A., General report: Methods of treatment of clay fills.
The Institution of Civil Engineers, London, 1979, (proc. Clay Fills),
s 315-321.

Clayton, C.R.I., Two aspects of the use of the moisture condition apparatus. Ground Engineering, London, 1979, (12:4), s 44-48.

Clayton, C.R.I., The collapse of compacted chalk fill. Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Paris, 1980, (proc. International conference on compaction), s 119-124.

D'Appolonia, D.J., Whitman, R.V. & D'Appolonia, E., Sand compaction with vibratory rollers. American Society of Civil Engineers, New York, 1969. (Vol. 95 NO. SM1), s 263-284.

Dennehy, J.P., The remoulded undrained shear strength of cohesive soils and its influence on the suitability of embankment fill. The Institution of Civil Engineers, London, 1979, (proc. Clay Fills), s 87-94.

Dimitrios, S., Hållfasthetens beroende av spänningvägen till brott hos en inpackad finkornig jord. Tekniska Högskolan i Lund, avdelningen för geoteknik, (under tryckning).

Dynamic Geotechnical Testing. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1978.

Essigmann, M.F., Altschaeffl, A.G. & Lovell, C.W., Method for Specifying Soil Compaction. Transportation Research Record; 690, 1978.

Fang, H.Y., Sampling Plans and Construction Control. Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau, Essen, 1975, (proc. Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering, 2nd International Conference), s 323-337.

Forssblad, L., Packning av jord- och stenfyllningar. Svenska Bokförlaget Bonniers, Stockholm, 1967.

Forssblad, L., Compaction meter on vibrating rollers for improved compaction control. Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Paris, 1980, (proc. International conference on compaction), s 541-546.

Forssblad, L., Vibratory Soil and Rock Fill Compaction. Dynapac Maskin AB, Solna, 1981.

Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. & Widger, R.A., The Shear Strength of Unsaturated Soils. Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, 1978, (Vol 15, N 3).

Frost, R.J., Guidelines for Compaction Control of Fill. American Society of Civil Engineers, New York, 1973, (Vol 99 SM12).

Grace, H. & Green, P.A., The use of wet fill for the construction of embankments for motorways. The Institution of Civil Engineers, London, 1979, (proc. Clay Fills), s 113-118.

Granström, M. & Wellander, T., Kontroll av packad moränleras egenskaper. Tekniska Högskolan i Lund, avdelningen för geoteknik, 1975, (Examensarbete nr R 66 Lund).

Gulhati, S.K., Structure of Compacted Fine Grained Soil and Changes in Structure upon Saturation. Indian Geotechnical Journal.

Hammarling, B., Fallviktsförsök i finkornig packad jordfyllning. Tekniska Högskolan i Lund, avdelningen för geoteknik, (under tryckning).

Hansbo, S., Deformationer och sättningar - ingår i Bygg 1b. AB Byggmästarens Förlag, Stockholm, 1972, s 355-378.

Hansbo, S., Jordmateriallära. Almqvist & Wiksell Förlag AB, Stockholm, 1975.

Hansbo, S. & Pramborg, B., Compaction control. Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Paris, 1980, (proc. International conference on compaction), s 559-564.

Hartleñ, J., Plattgrundläggning på moränlera. Statens geotekniska institut, Stockholm 1972, (Särtryck och prel. rapporter no. 54), s 17-32.

Hartleñ, J., Fält- och laboratoriemetoder vid undersökning av moränlera. Statens geotekniska institut, Stockholm 1972, (Särtryck och prel. rapporter no. 54), s 33-38.

Hartleñ, J., Skånska moränlerors hållfasthets- och bärig-hetsegenskaper. Chalmers Tekniska Högskola, institutionen för geoteknik med grundläggning, Göteborg, 1974.

Hartleñ, J., Finkornig fyllnings geotekniska egenskaper. Tekniska Högskolan i Lund, avdelningen för geoteknik, 1976.

Heiner, A., Strength and compaction properties of frozen soil. Statens Råd för Byggnadsforskning, Stockholm, 1972, (D11:1972).

Helenelund, K.V., Moreenimaalajien kantavuusominaisuuksista. Valtion Teknillien Tutkimuslaitos, Helsinki, 1964.

Hellman, P., Pramborg, B.O. & Svensson, G., Kontroll av packad friktionsjord. Statens Råd för Byggnadsforskning, Stockholm, 1979, (R102:1979).

Hilf, J.W., Compacted Fills. Foundation Engineering Handbook, Van Nostrand Reinhold Co., New York, s 244-311.

Huitfeldt, B., Statistisk metoder för experimentella undersökningar. Studentlitteratur, Lund, 1972.

Högberg, E., Vattenhaltens inverkan på densitet och kompressibilitet hos packade jordar. Statens Råd för Byggnadsforskning, Stockholm, 1972. (R:8 1972).

Ingles, O.G. & Williams, H.J., Dry-of-optimum compaction and saturation settlements. Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Paris, 1980, (proc. International conference on compaction), s 139-144.

In situ Measurement of Soil Properties. American Society of Civil Engineers, New York, 1975, (proceedings).

Janbu, N., Grunnlag i geoteknikk. Tapir forlag, Oslo, 1970.

Kumar, L. & Weber, J.A., Compaction of Unsaturated Soil by Different Stress Paths. Transactions of ASAE, 1974.

Lambe, T.W., The Structure of Compacted Clay. American Society of Civil Engineers, New York, 1958, (Vol 84 No SM2)

Lambe, T.W., The Engineering Behavior of Compacted Clay. American Society of Civil Engineers, New York, 1958, (Vol 84 No SM2).

Lindblom, U., Kompressionsegenskaper hos traktorutbredda sprängstensfyllningar Sättningar hos grundplattor. Statens Råd för Byggnadsforskning, Stockholm, 1973, (R12:1973).

Lindskog, L., Arbetsteknik och ekonomi vid schaktning och fyllning med moränlera. Statens geotekniska institut, Stockholm, 1972, (Särtryck och prel. rapporter no. 54), s 53-58.

Lubking, P., Janse, E., Jonker, J.F. & De Jager, W.F.J. Investigation of the variation of density, rigidity and bearing capacity measuring results on behalf of the acceptance control of sand subbases. Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Paris, 1980, (proc. International conference on compaction), s 515-521.

Malmborg, B.S., Fyllning med finkornig jord - delrapport 1. Tekniska Högskolan i Lund, avdelningen för geoteknik, 1978, (TVGT-3001).

Malmborg, B.S., Fyllning med finkornig jord - delrapport 2. Tekniska Högskolan i Lund, avdelningen för geoteknik, 1980, (TVGT-3016).

Malmborg, B.S., Resultatsammanställning Sonderingar Oxie. Tekniska Högskolan i Lund, avdelningen för geoteknik, 1982, (TVGT-7010).

Malmborg, B.S., Resultatsammanställning Pressometer Oxie. Tekniska Högskolan i Lund, avdelningen för geoteknik, 1982, (TVGT-7011).

Malmborg, B.S., Resultatsammanställning Fallvikt Oxie. Tekniska Högskolan i Lund, avdelningen för geoteknik, 1983, (TVGT-7012).

Mark AMA 83. AB Svensk Byggtjänst, Stockholm, 1983.

Ohta, H. & Hata, S., Strength of Dynamically Compacted Soils. International conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, 1977, (proc. Vol 1), s 239-242.

Ottoson, E. & Möller, B., Bärförmåga och sättningar i flygaskafyllningar beräknade utifrån pressometer- och spetstrycksonderingsresultat. Statens geotekniska institut, Linköping, 1982.

Parsons, A.W., Moisture condition test for assessing the engineering behaviour of earthwork material. The Institution of Civil Engineers, London, 1979. (proc. Clay Fills), s 169-176.

Parsons, A.W., General report: Construction and placement of clay fills. The Institution of Civil Engineers, London, 1979, (proc. Clay Fills), s 307-314.

RA 83 Mark. AB Svensk Byggtjänst, Stockholm, 1983.

Richart, F.E., Hall, J.R. & Woods, R.D., Vibrations of Soils and Foundations. Prentice-Hall, London, 1970.

SBN 80. Statens Planverks Författningssamling, Stockholm, 1980, (PFS 1980:1)

Schmertmann, J.H., Guidelines for Cone Penetration Test. U.S. Department of Transportation, Washington D.C., 1978.

Scientific Subroutine Package. Norsk Data A.S., Oslo, 1972.

Stål, T., Sturups flygplats. Statens geotekniska institut, Stockholm, 1972, (Särtryck och prel. rapporter no. 54), s 59-62.

Thurner, H. & Sandström, A, A new device for instant compaction control. Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Paris, 1980, (proc. International conference on compaction), s 611-614.

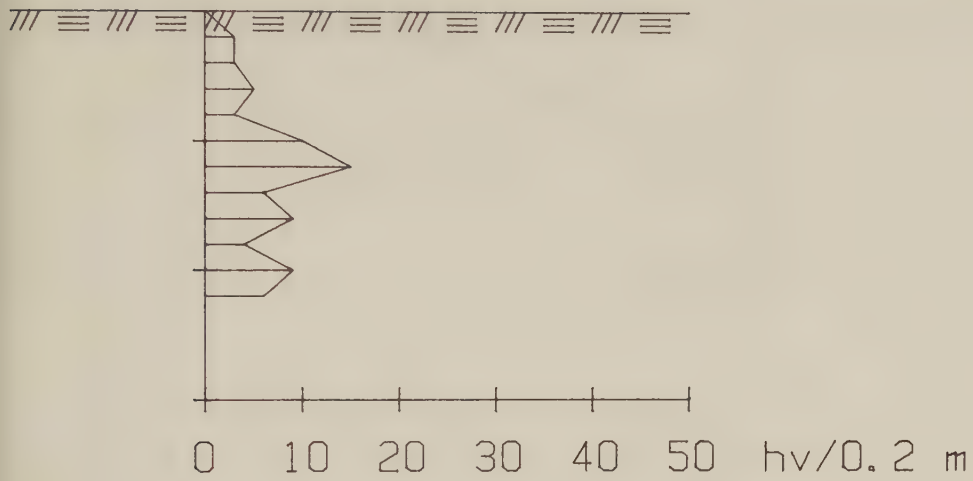
Vaughan, P.R., General report: Engineering properties of clay fills. The Institution of Civil Engineers, London, 1979, (proc. Clay Fills), s 293-295.

Withiam, J.L. & Kulhawy, F.H., Undrained Volume Changes in Compacted Cohesive Soil. American Society of Civil Engineers, New York, 1976, (Vol 102, GT10).

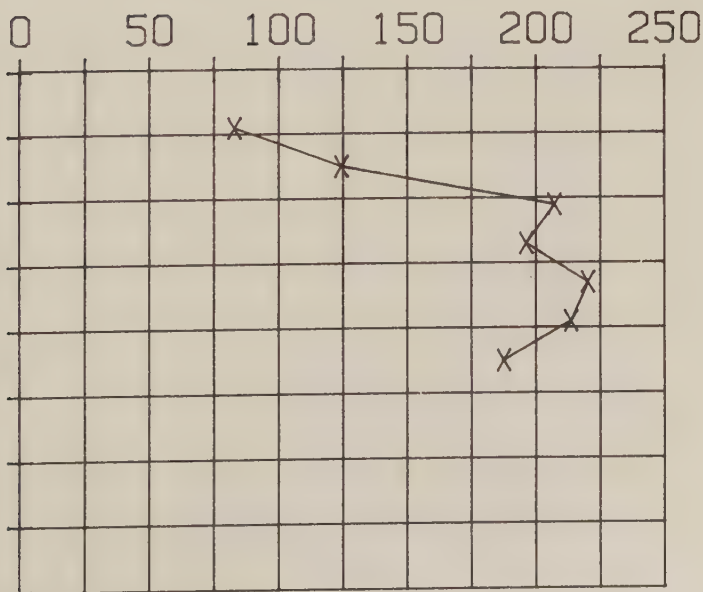
Väppling, L., Skjuvvågshastighet i finkornig jordfyllnig vid varierande packningsarbete och vattenkvot. Tekniska Högskolan i Lund, avdelningen för geoteknik, 1981, (TVGT-5005).

Bilagor

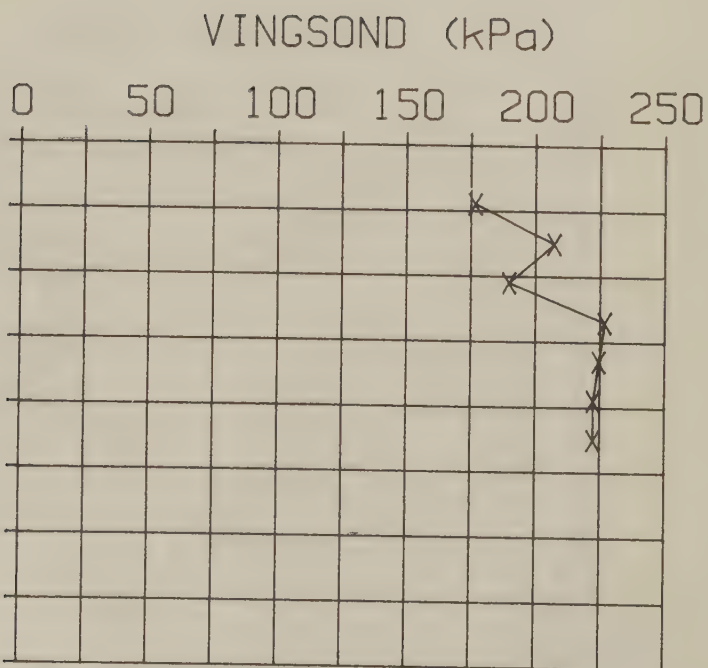
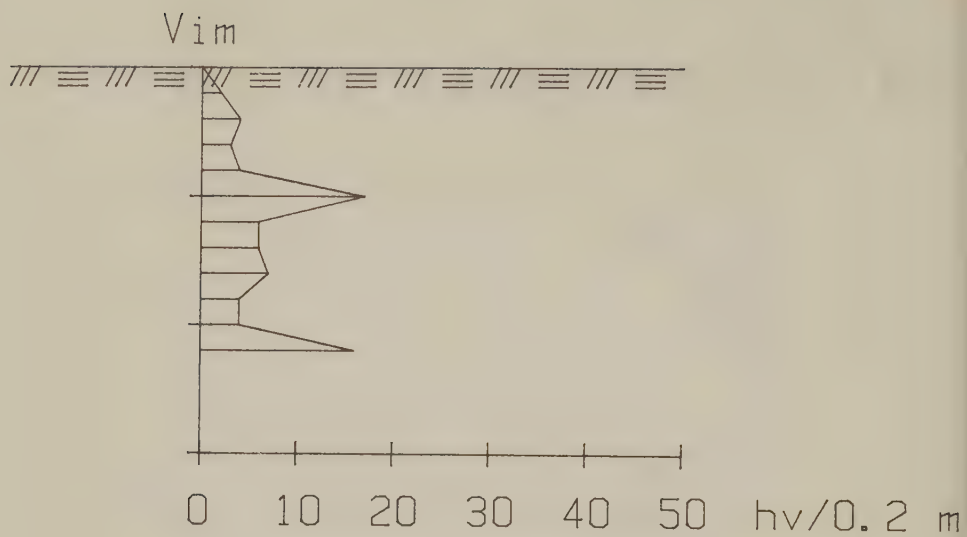
Vim



VINGSOND (kPa)

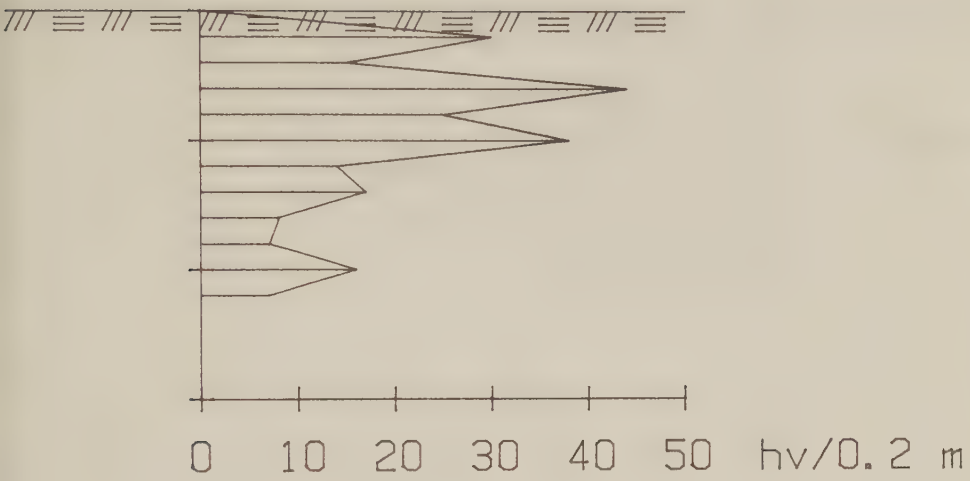


Exempel på sonderingsresultat, yta A, Oxie.

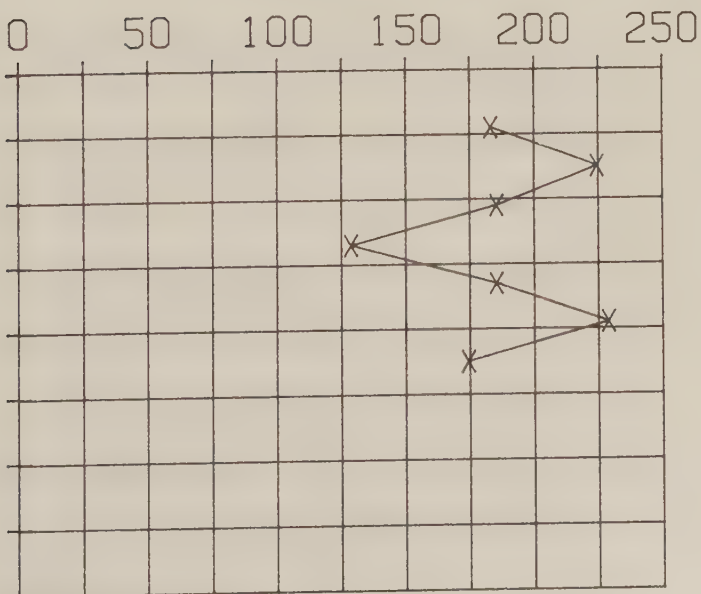


Exempel på sonderingsresultat, yta B, 0xie.

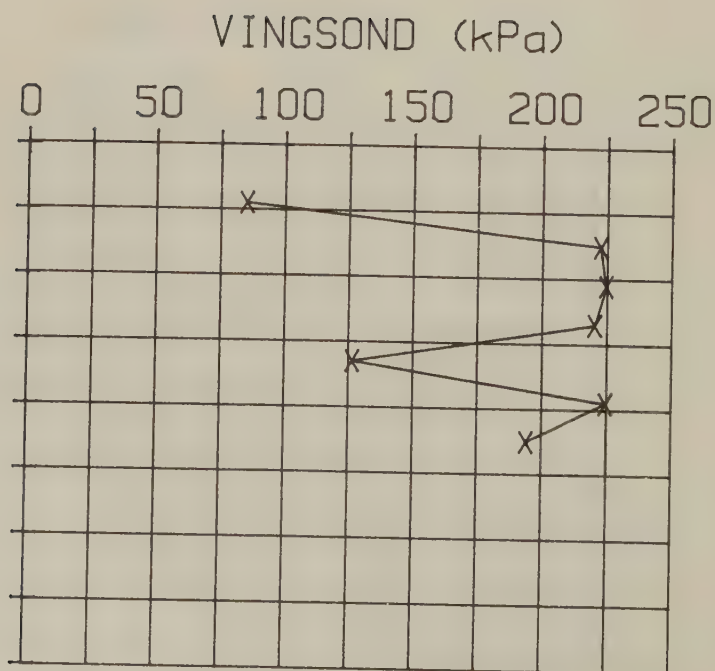
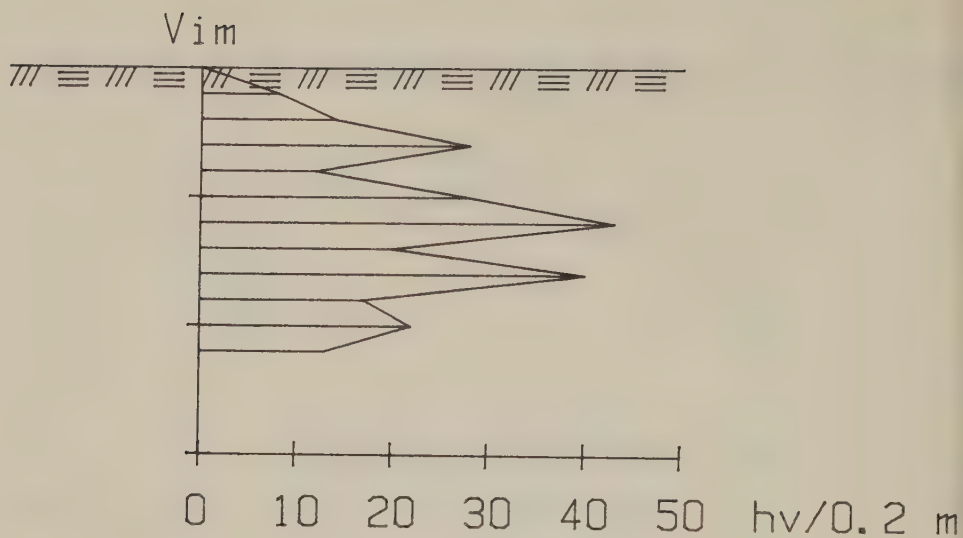
Vim



VINGSOND (kPa)

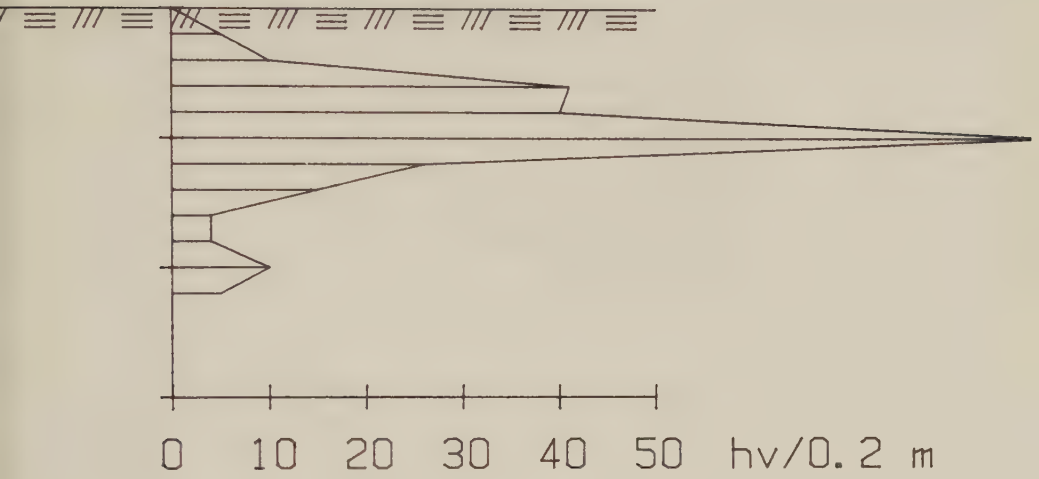


Exempel på sonderingsresultat, yta C, Oxie.

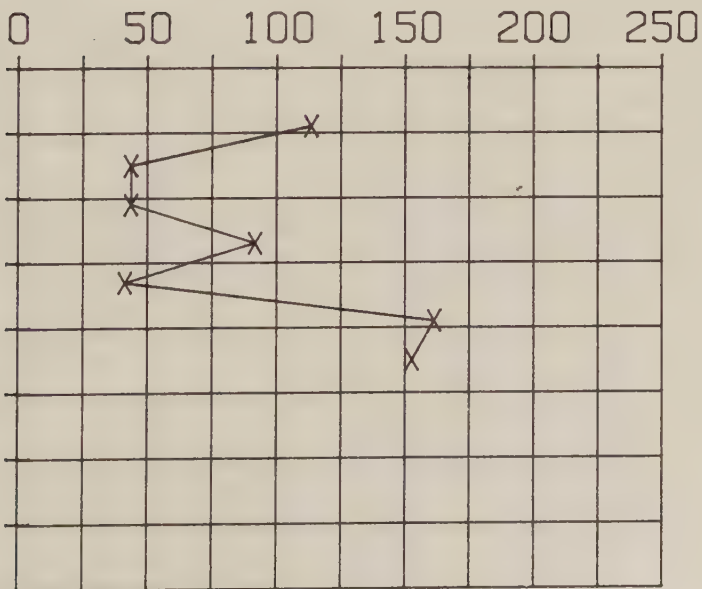


Exempel på sonderingsresultat, yta D, Oxie.

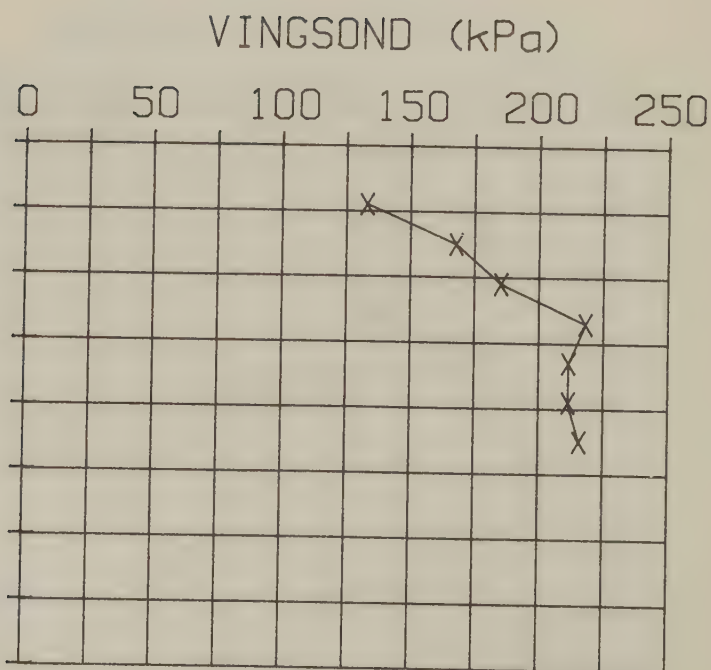
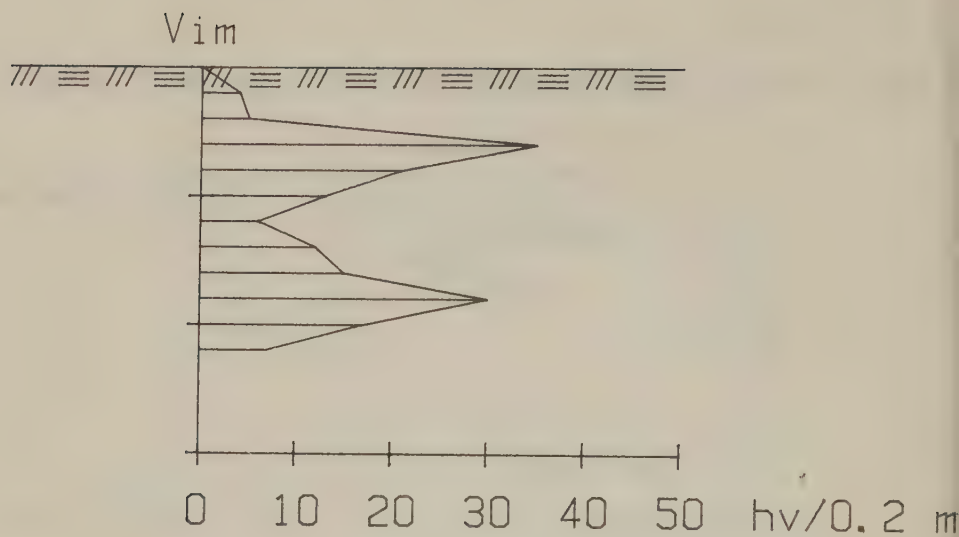
Vim



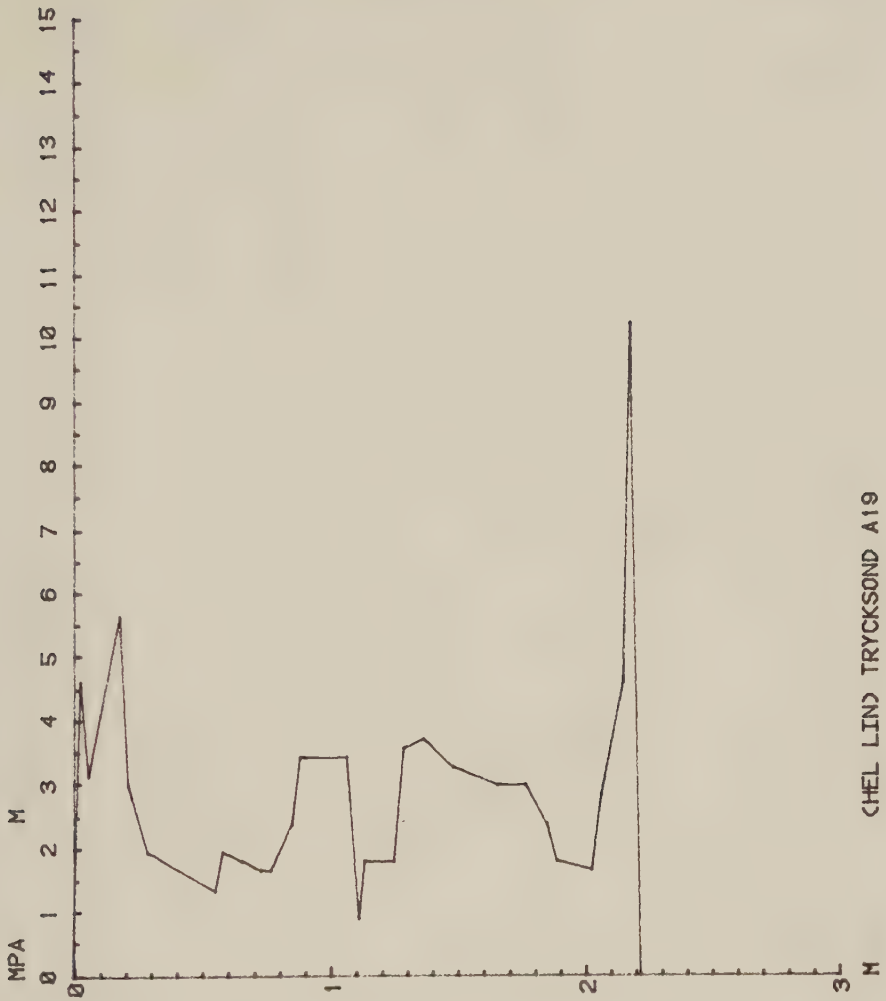
VINGSOND (kPa)



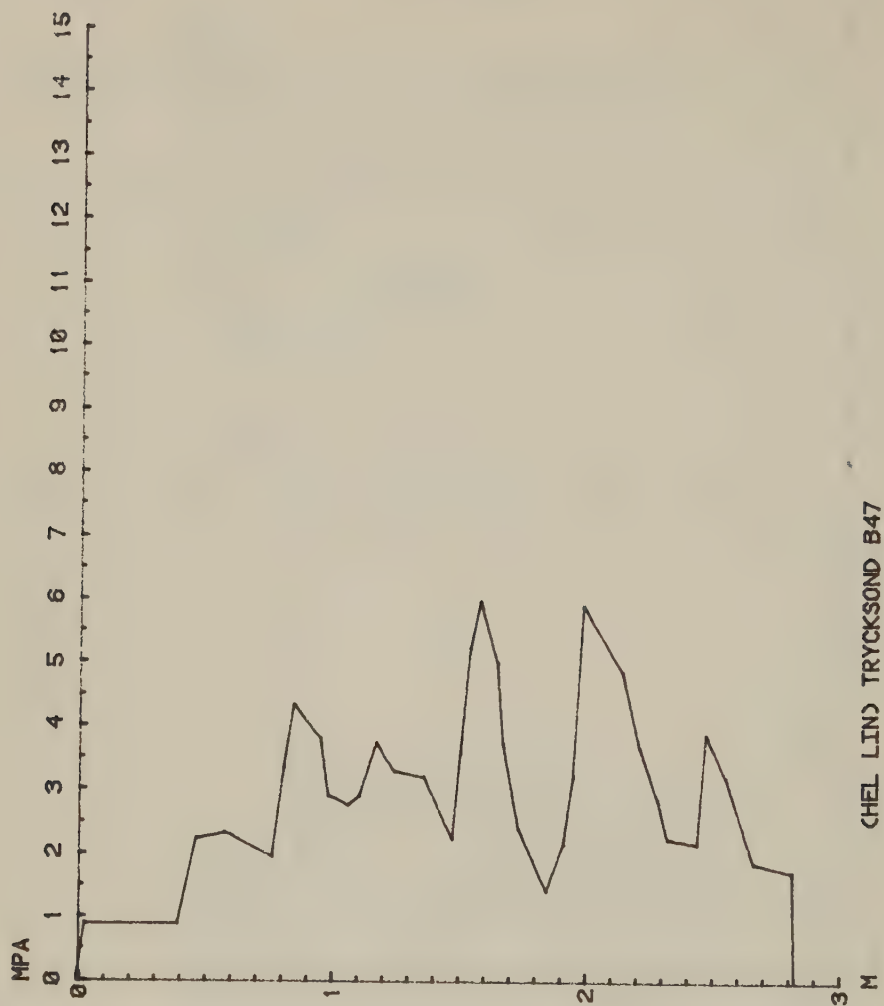
Exempel på sonderingsresultat, yta E, Oxie.



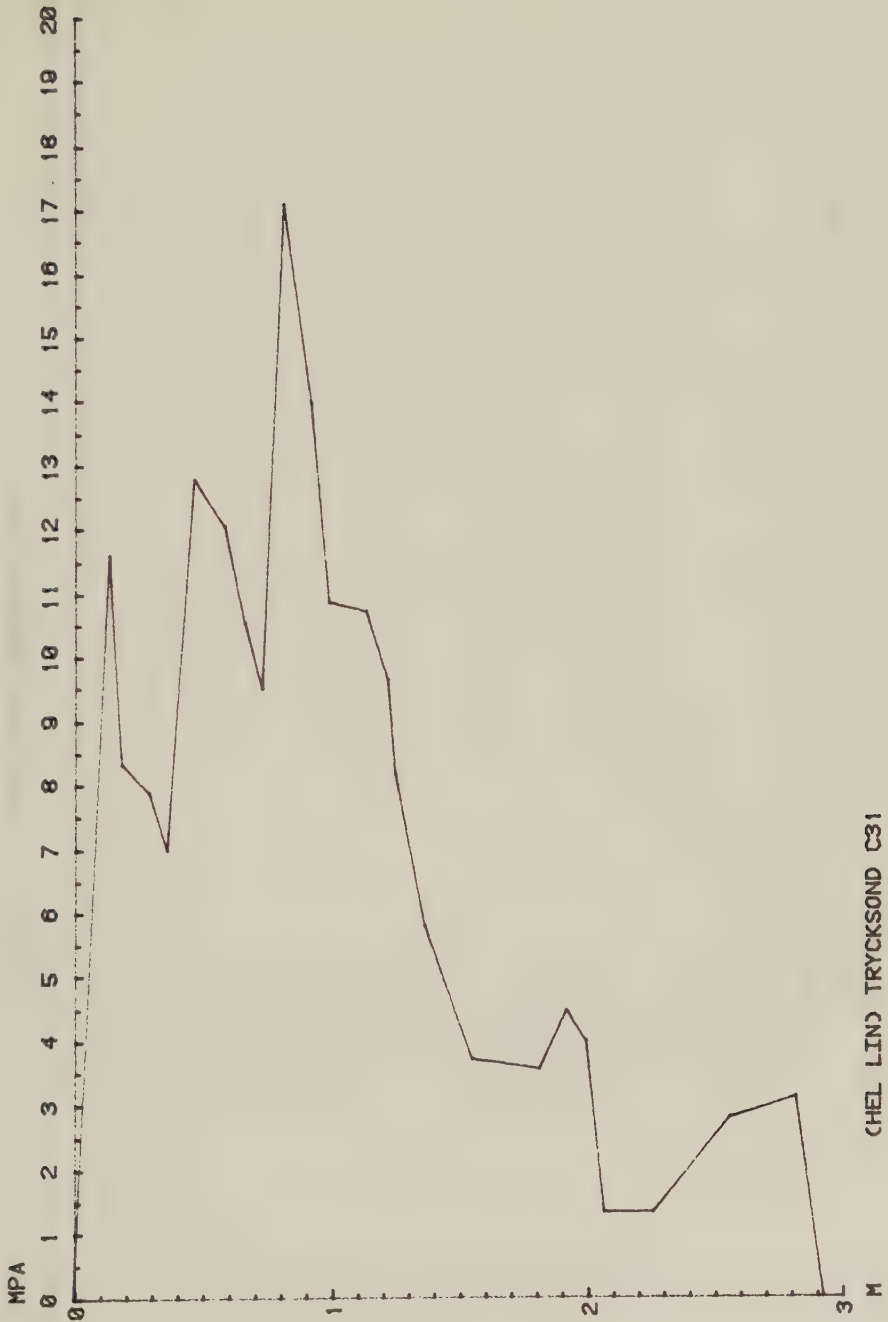
Exempel på sonderingsresultat, yta F, Oxie.



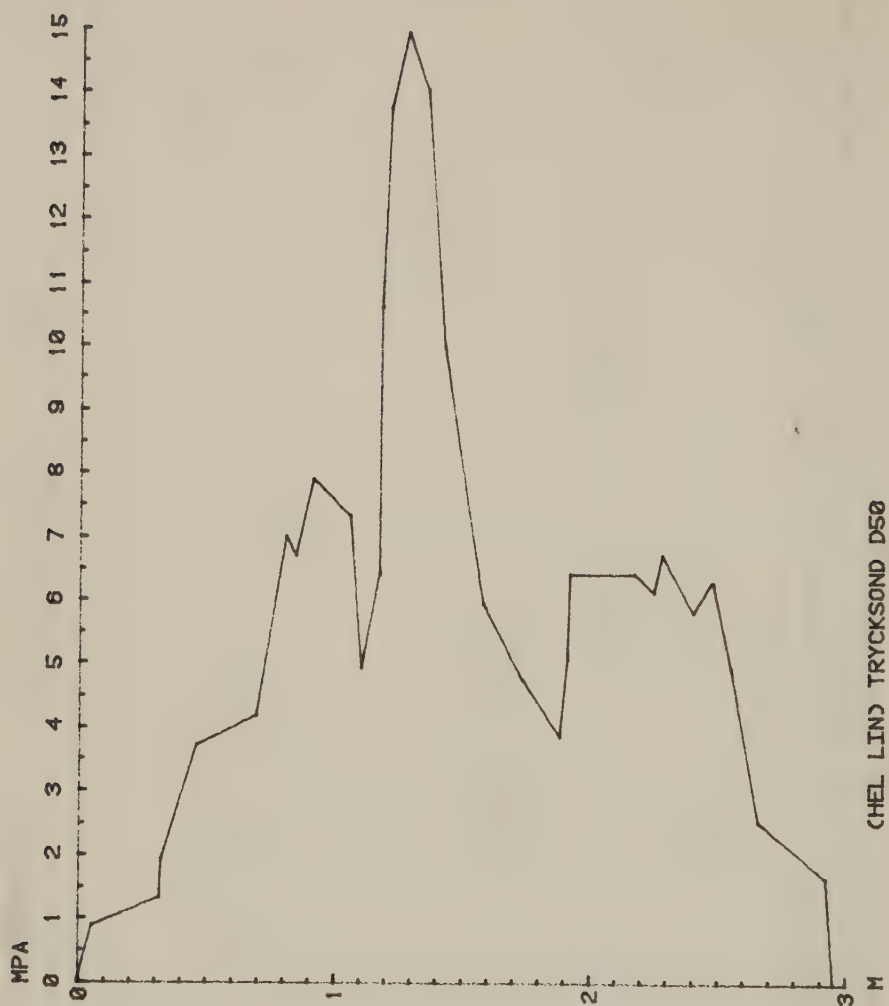
Exempel på spetstrycksonderingsresultat, yta A, Oxie.



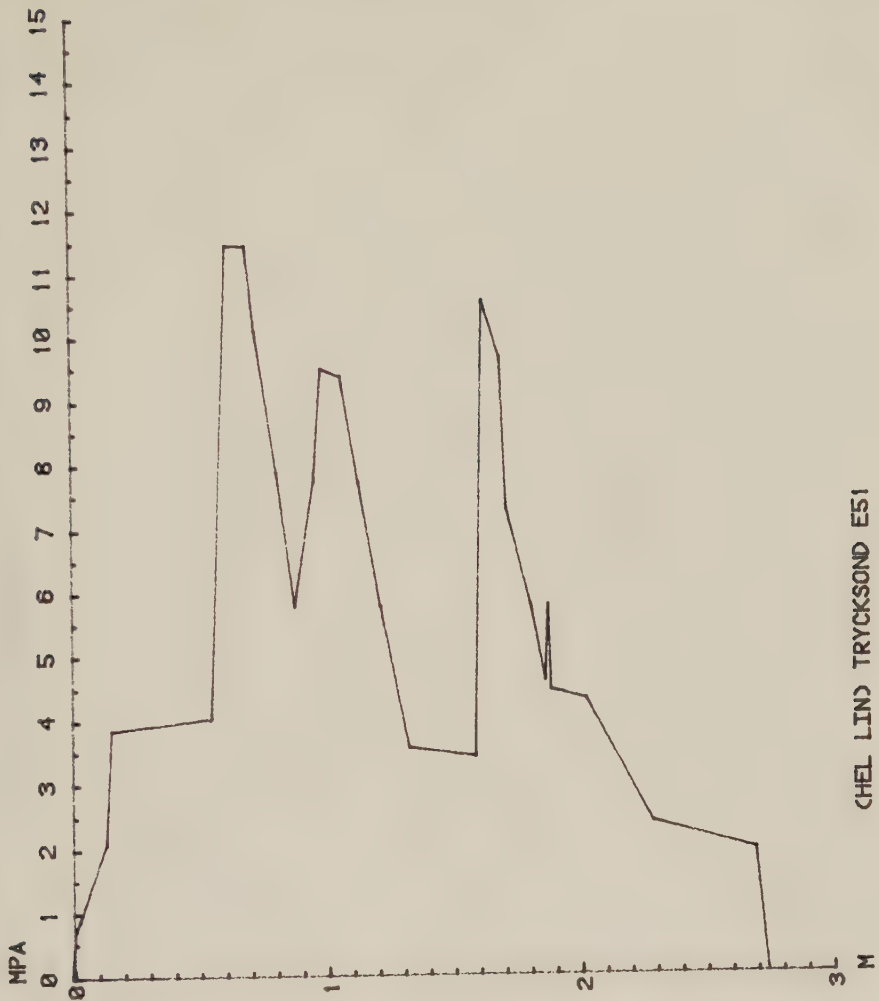
Exempel på spetstrycksonderingsresultat, yta B, Oxie.



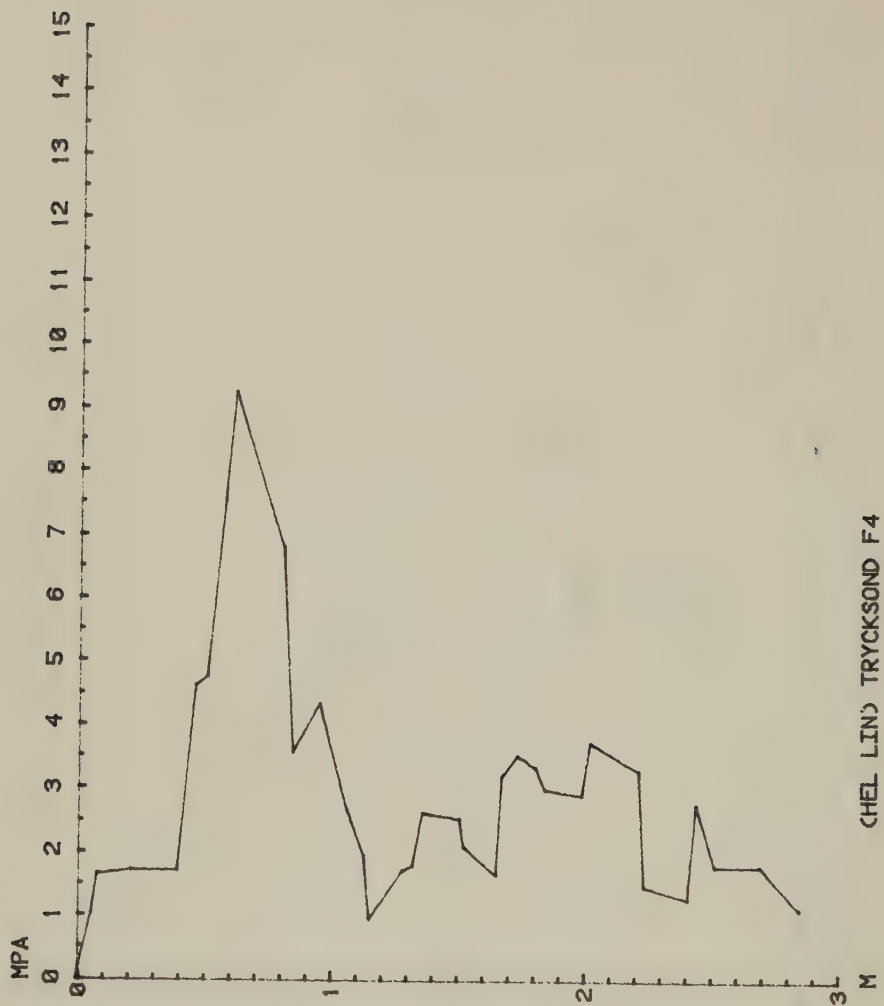
Exempel på spetstrycksonderingsresultat, yta C, Oxie.



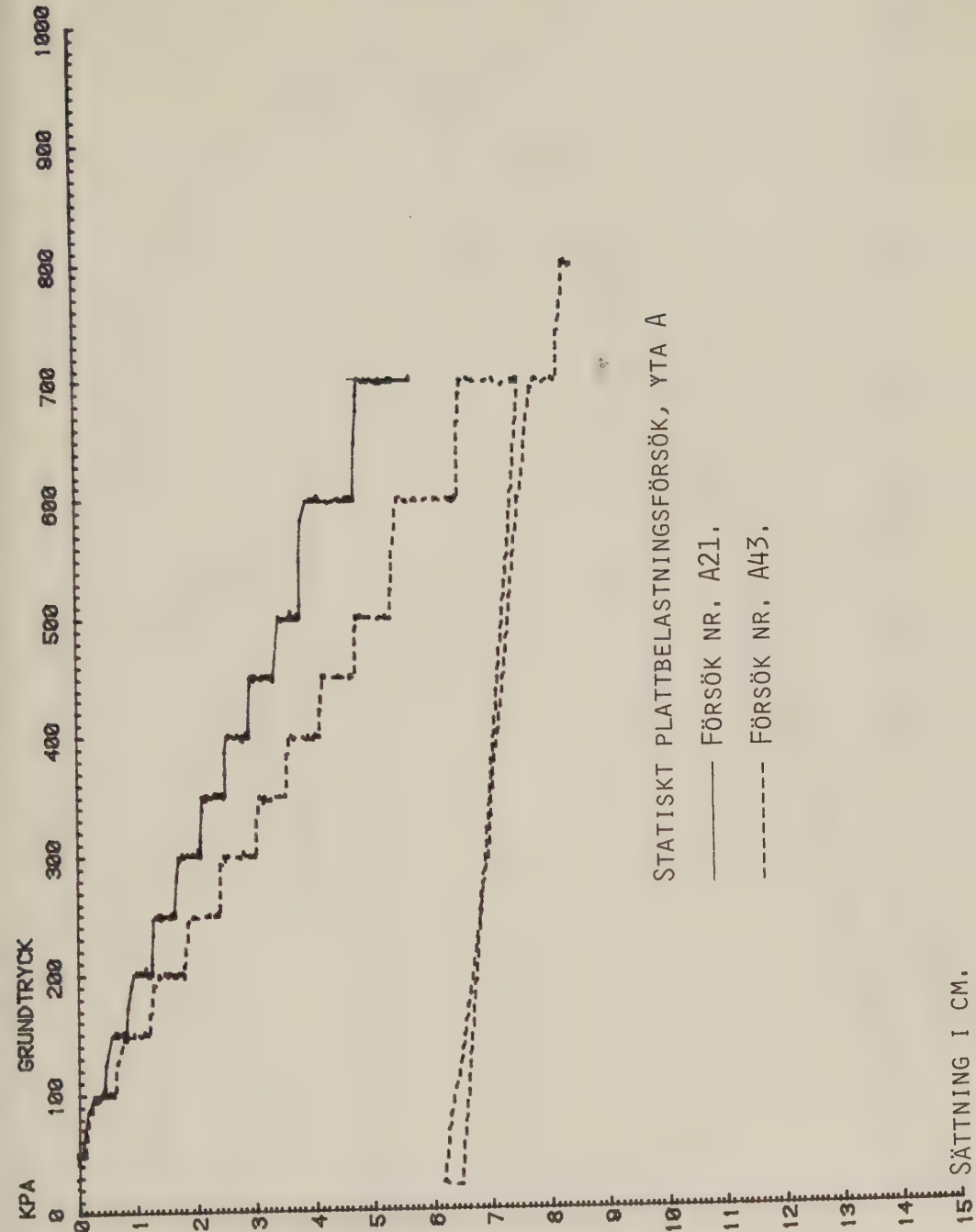
Exempel på spetstrycksonderingsresultat, yta D, Oxie.

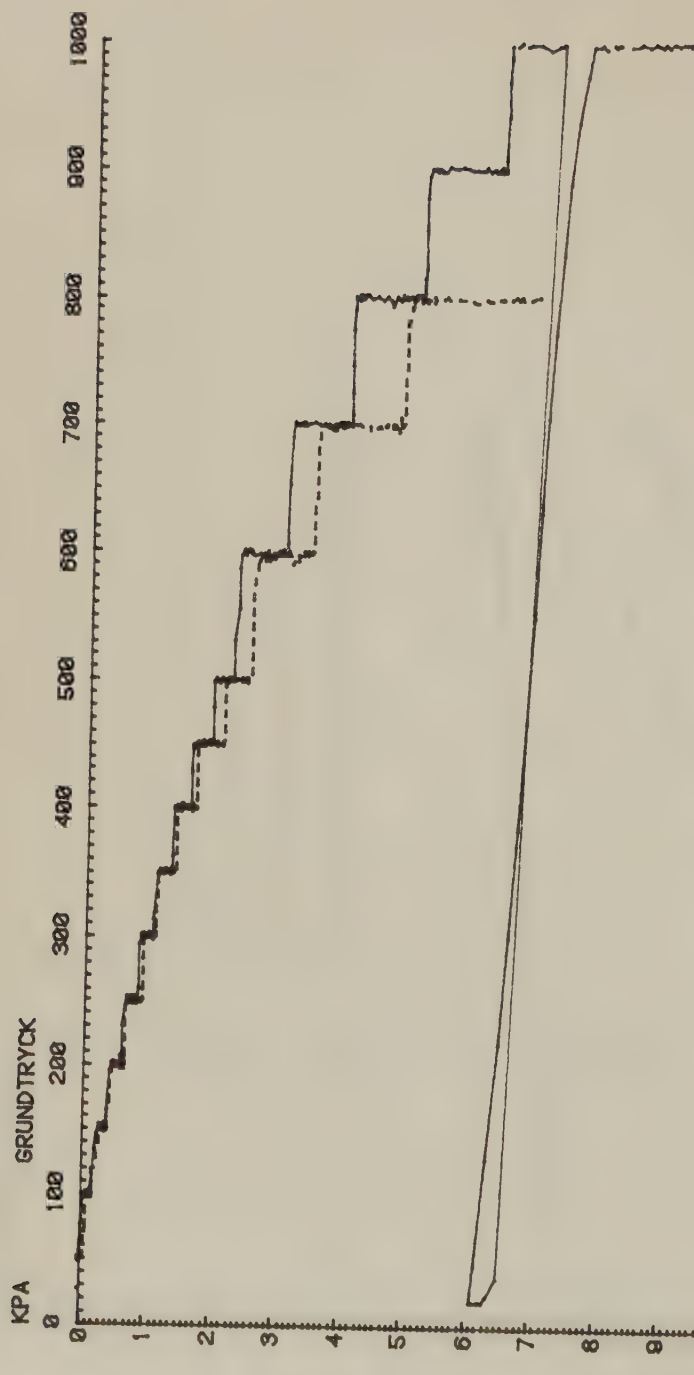


Exempel på spetstrycksonderingsresultat, yta E, Oxie.



Exempel på spetstrycksonderingsresultat, yta F, Oxie.



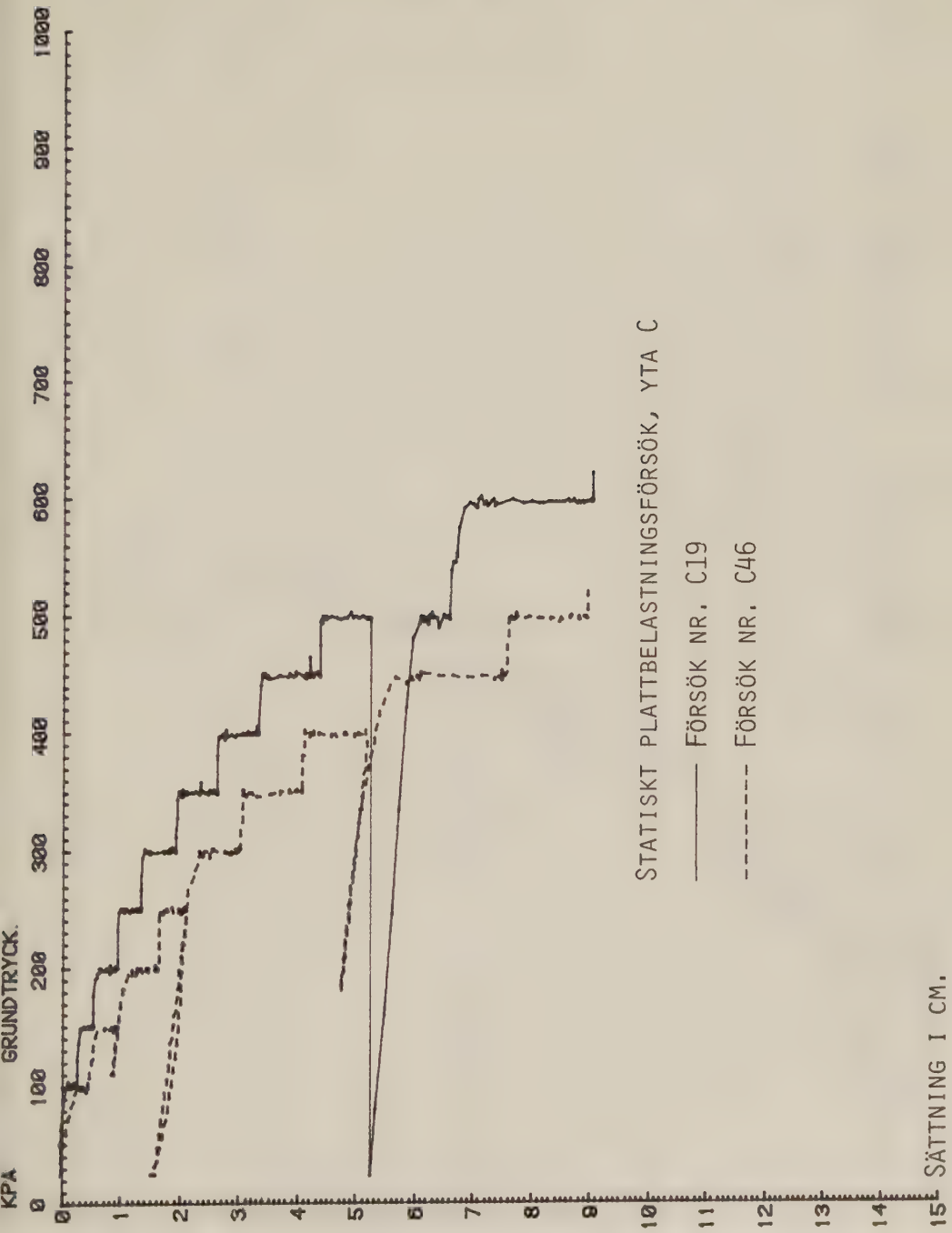


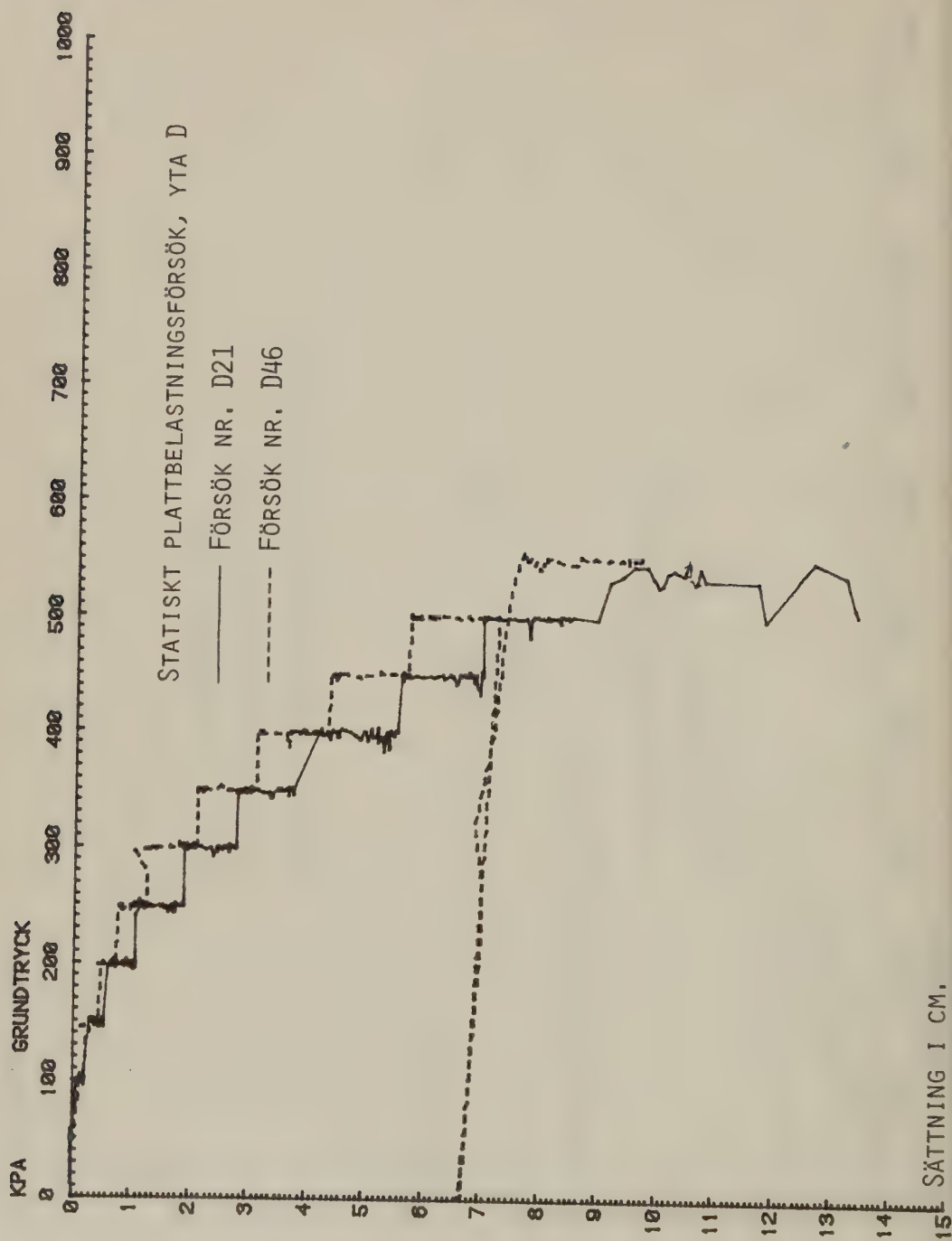
STATISKT PLATTBELASTNINGSFÖRSÖK, YTA B

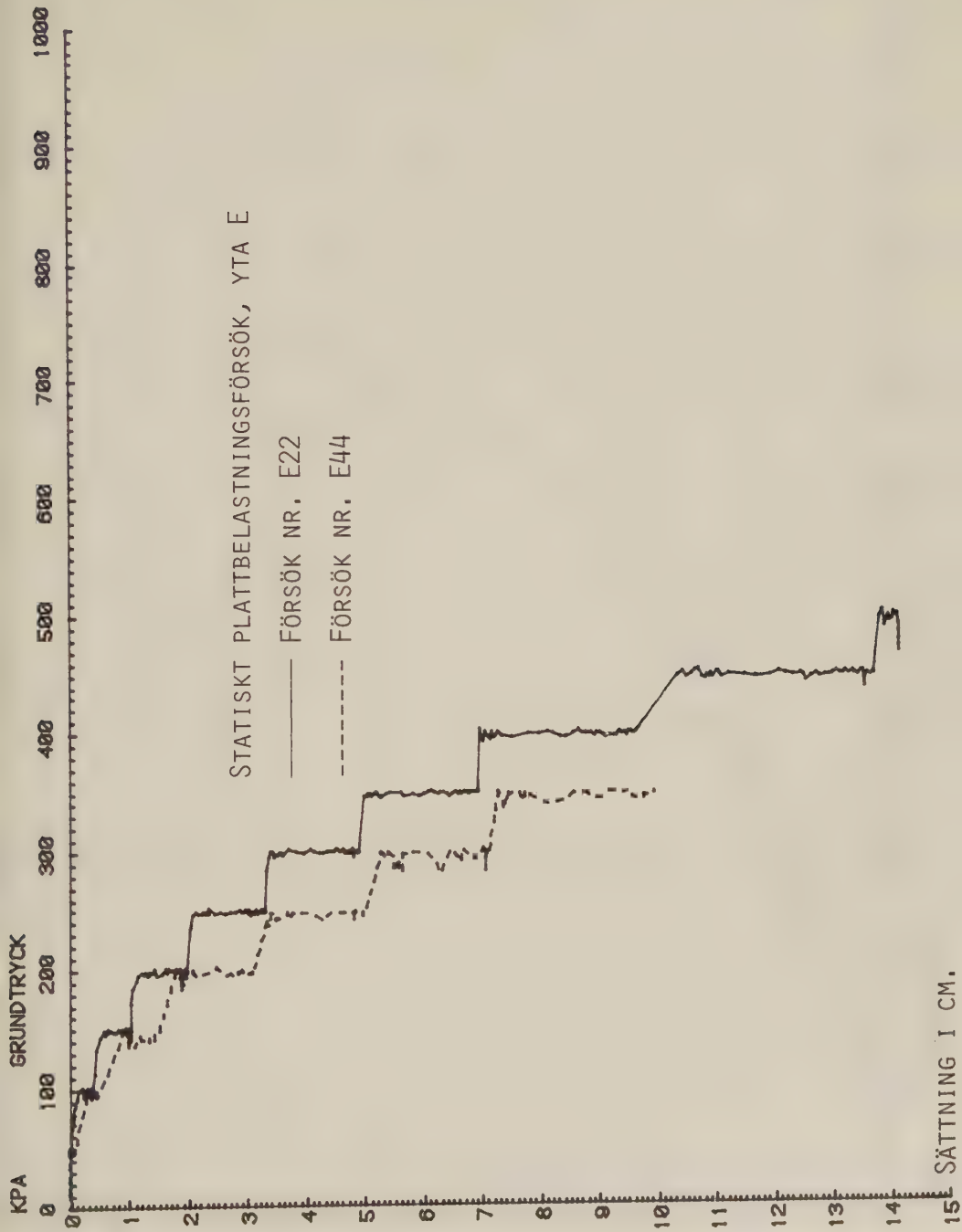
— FÖRSÖK NR. B22

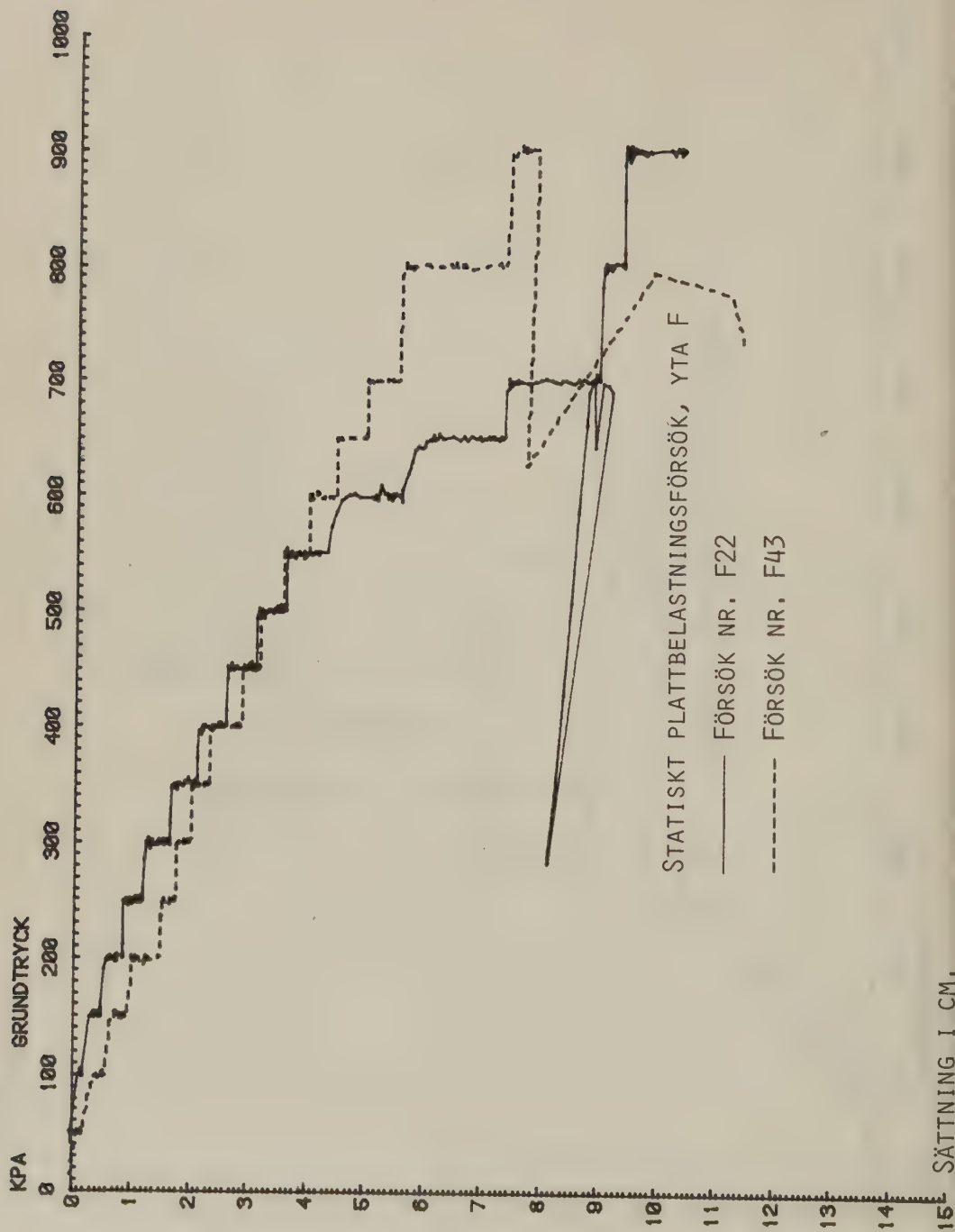
- - - FÖRSÖK NR. B44

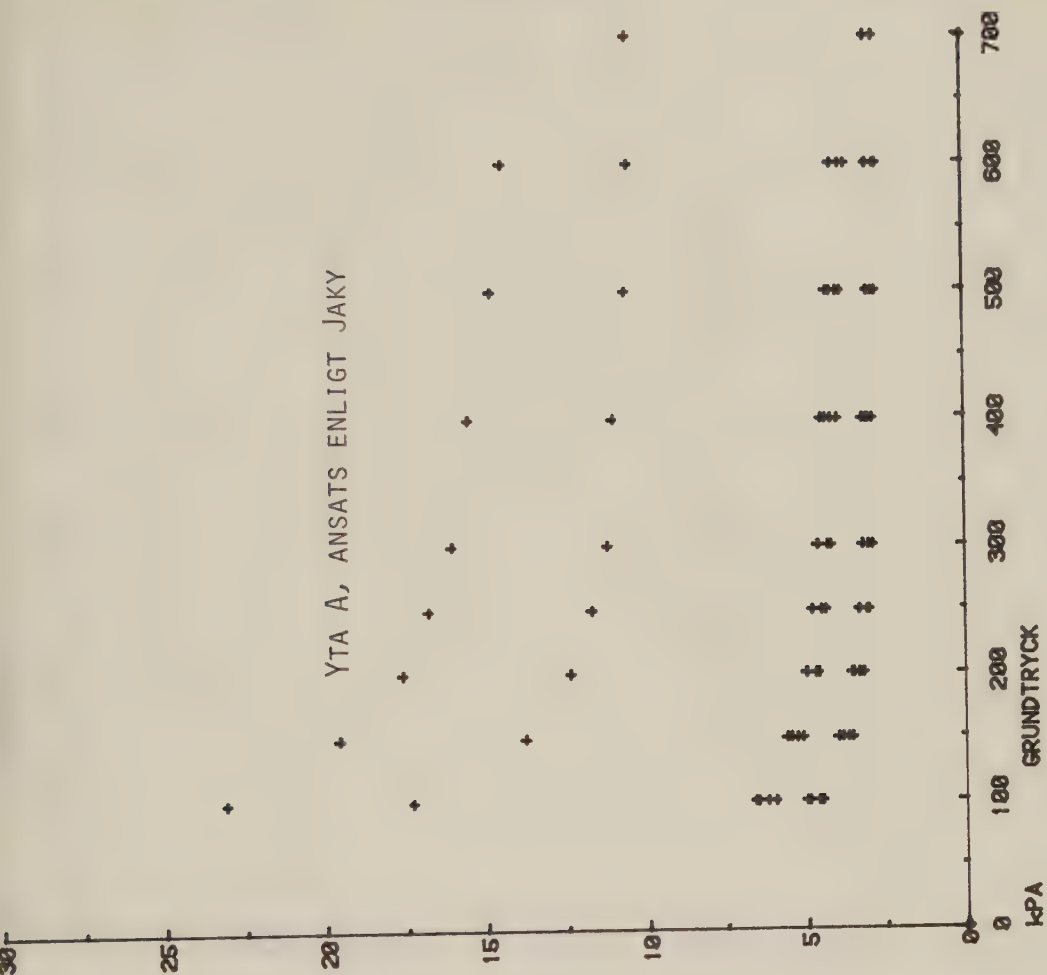
15 SÄTTNING I CM.

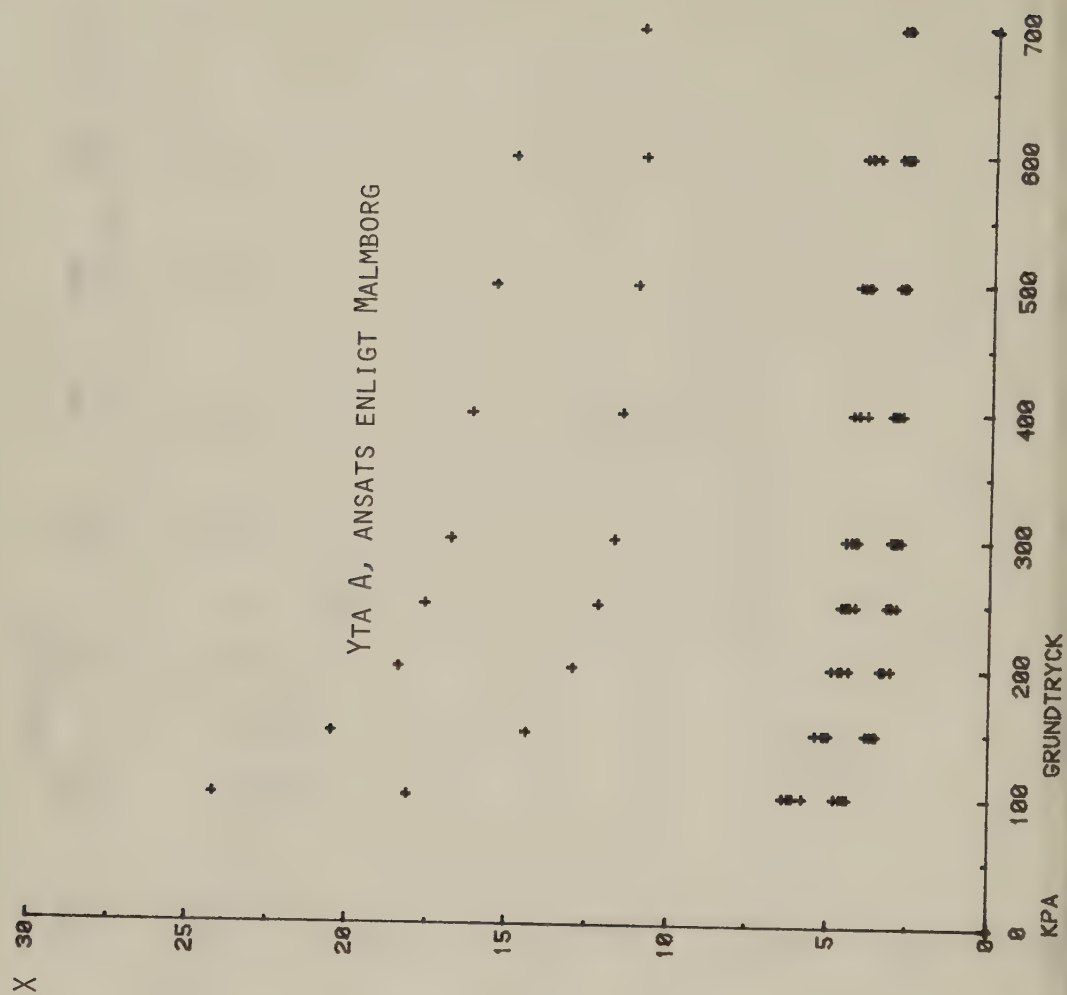




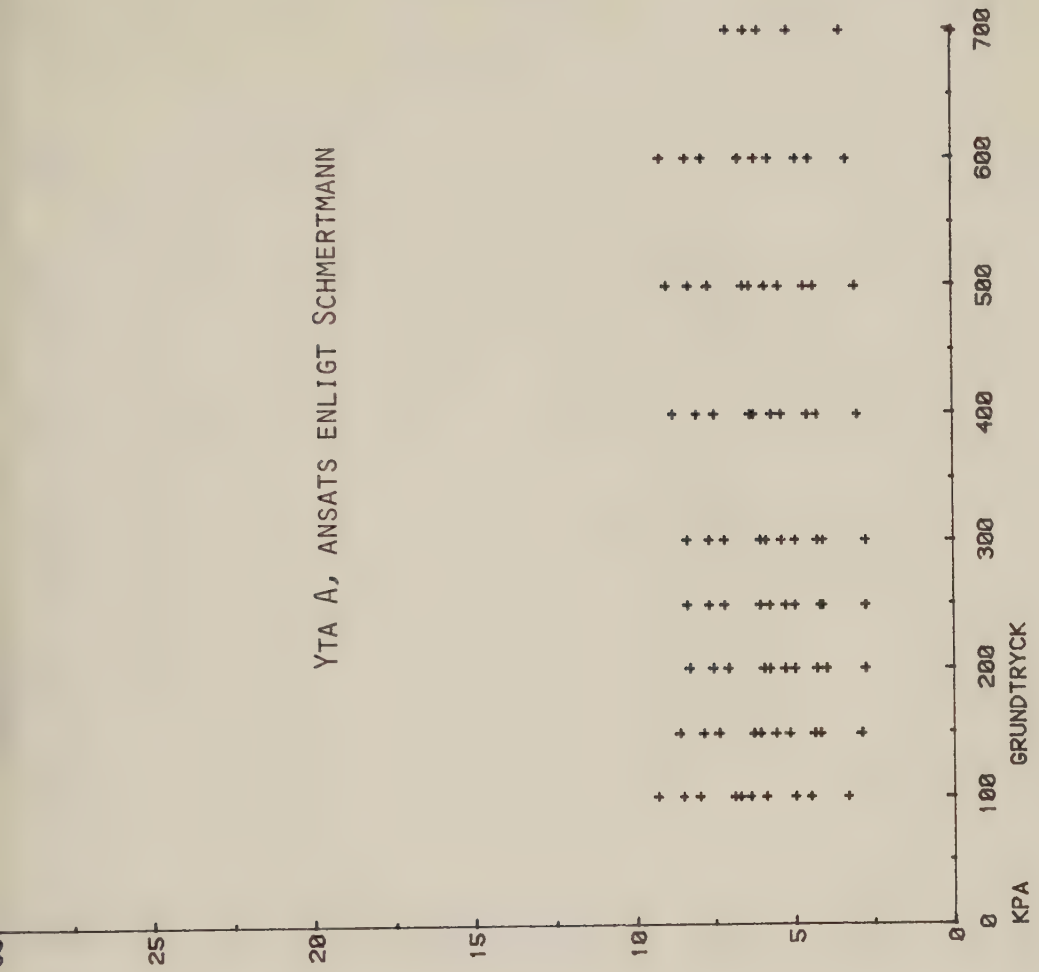


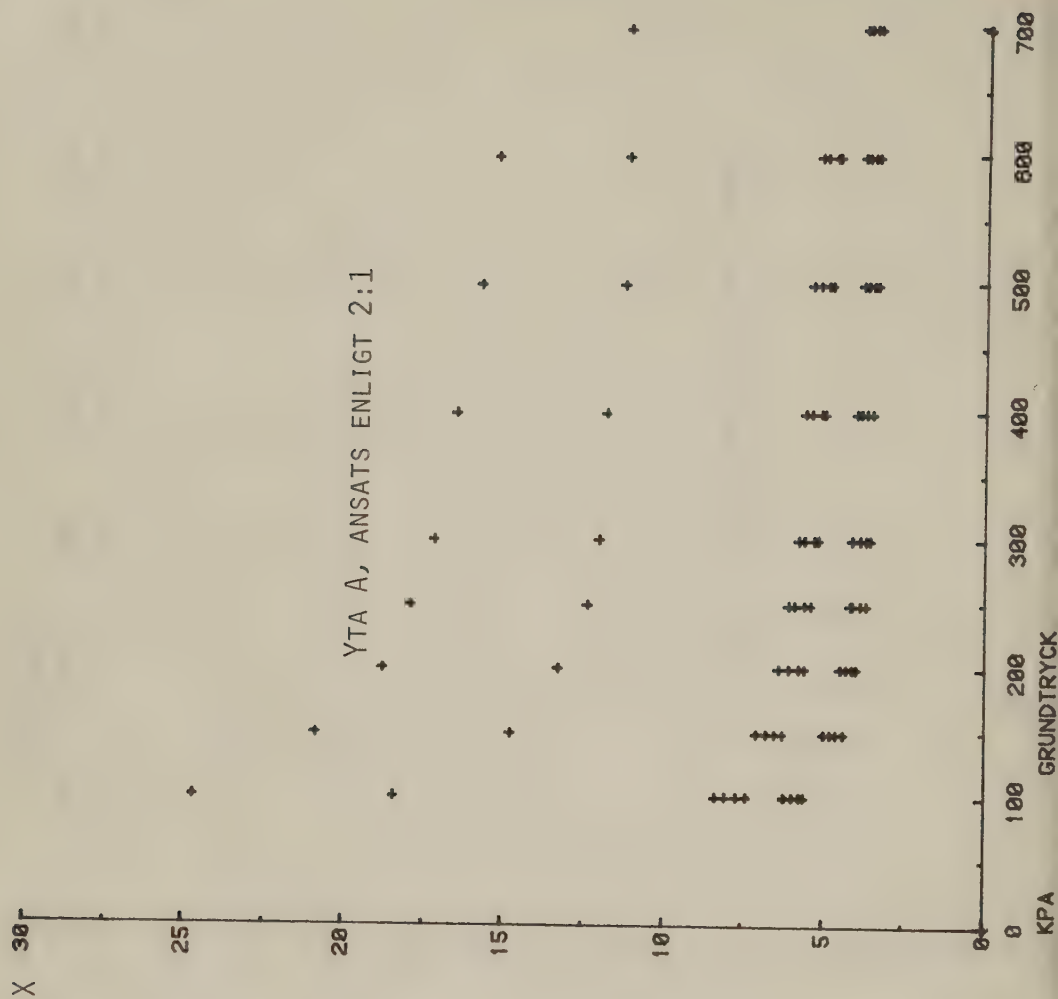




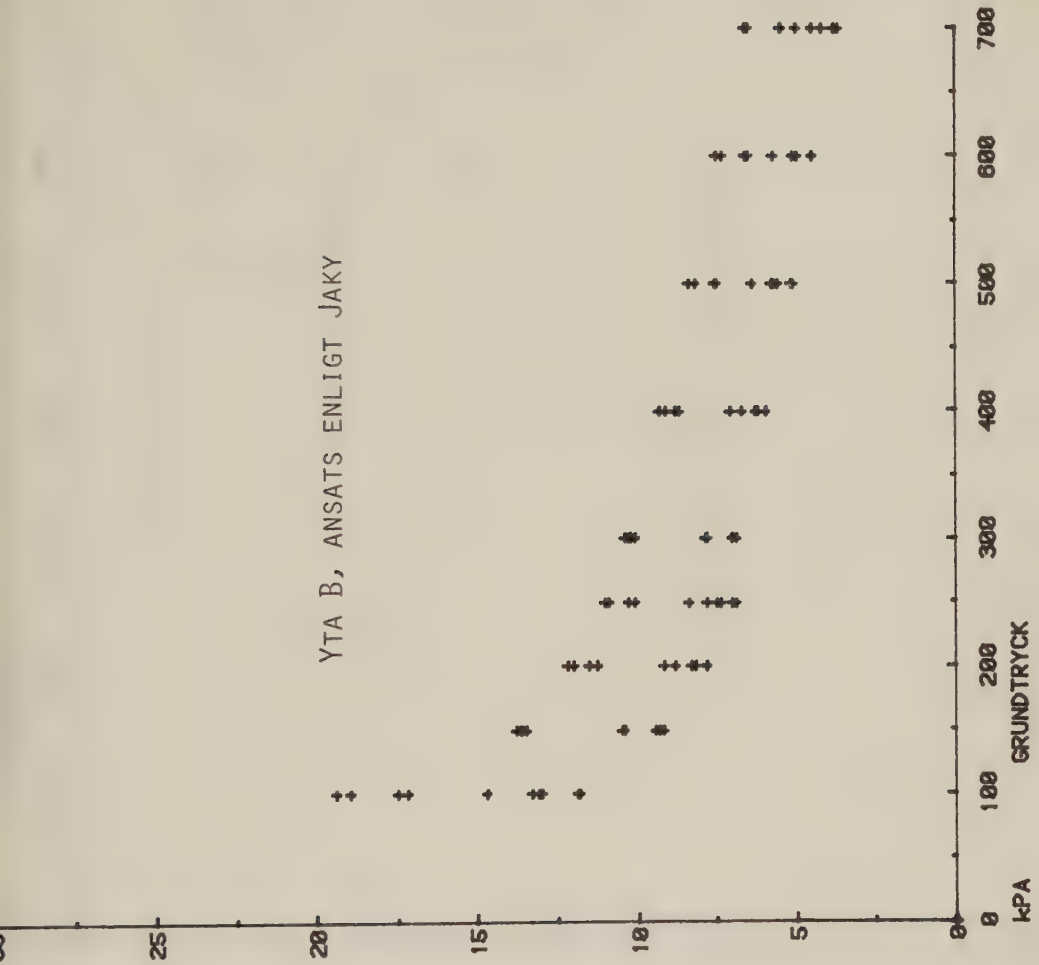


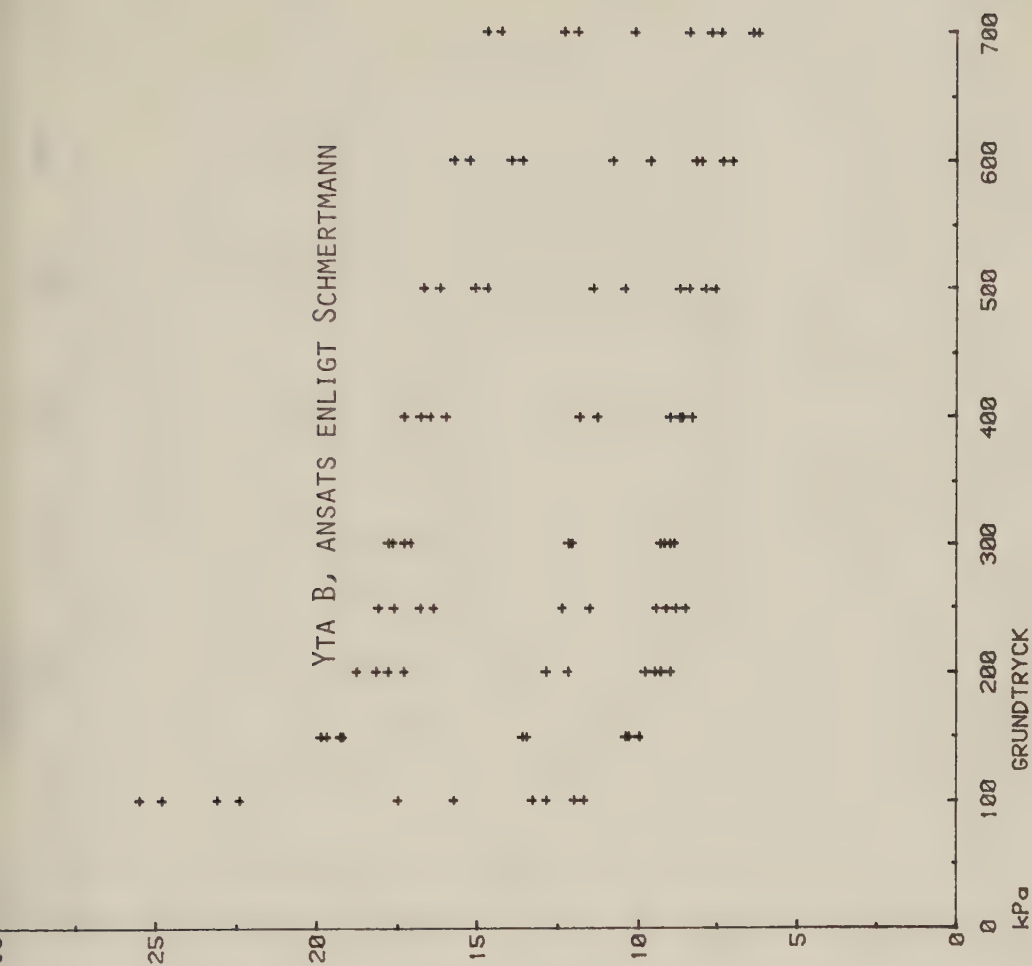
YTA A, ANSATZ ENLIGT SCHMERTMANN

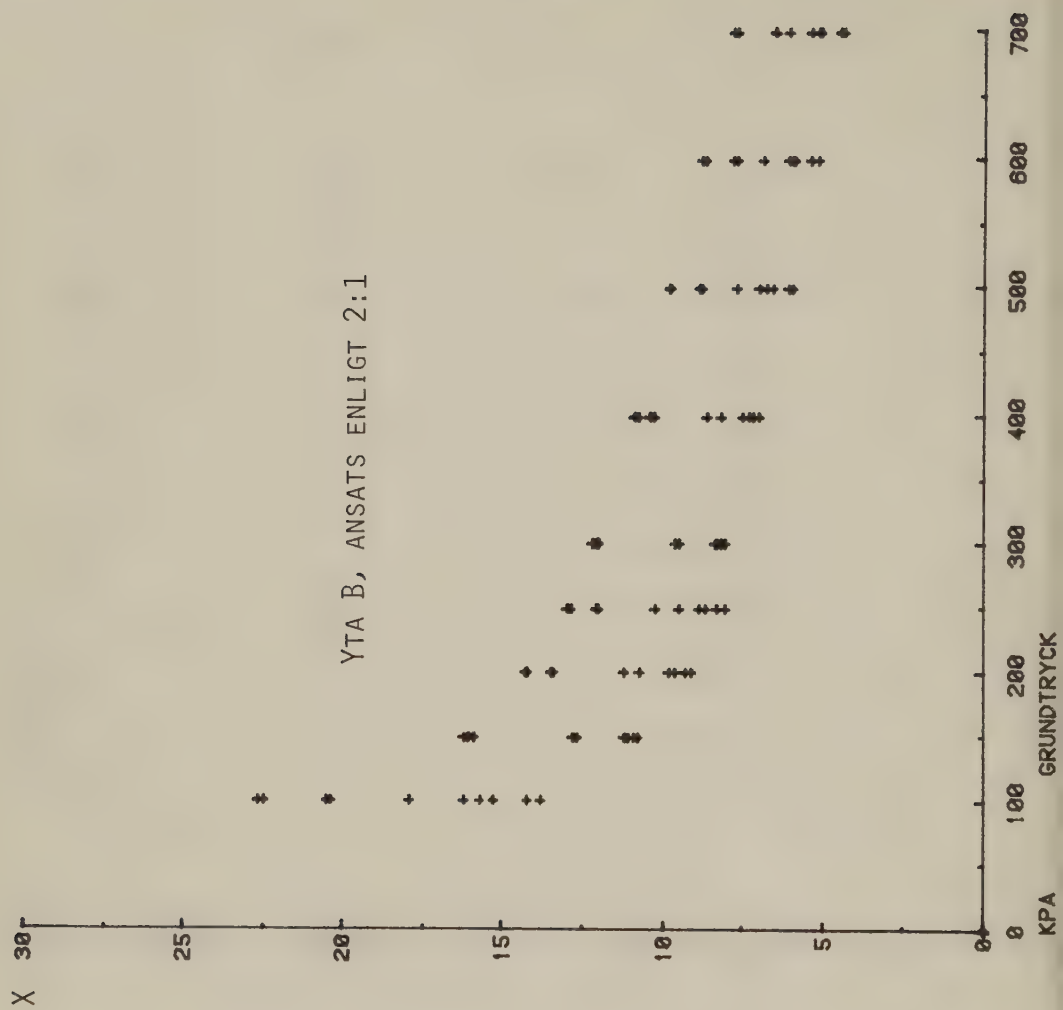


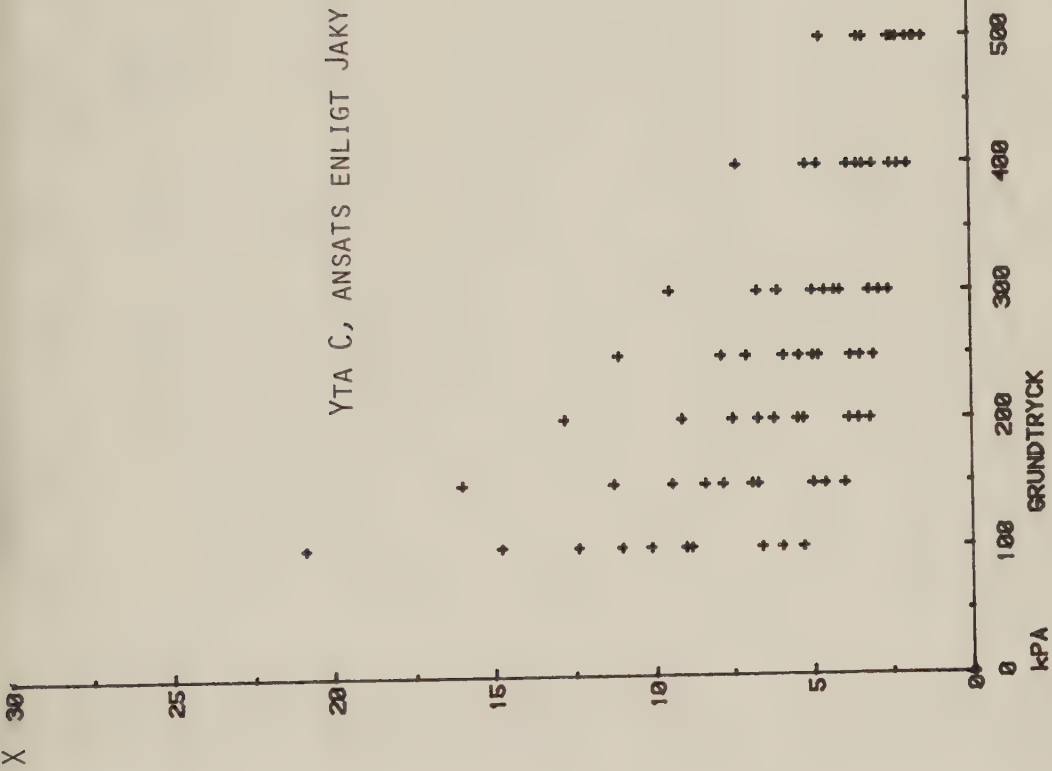


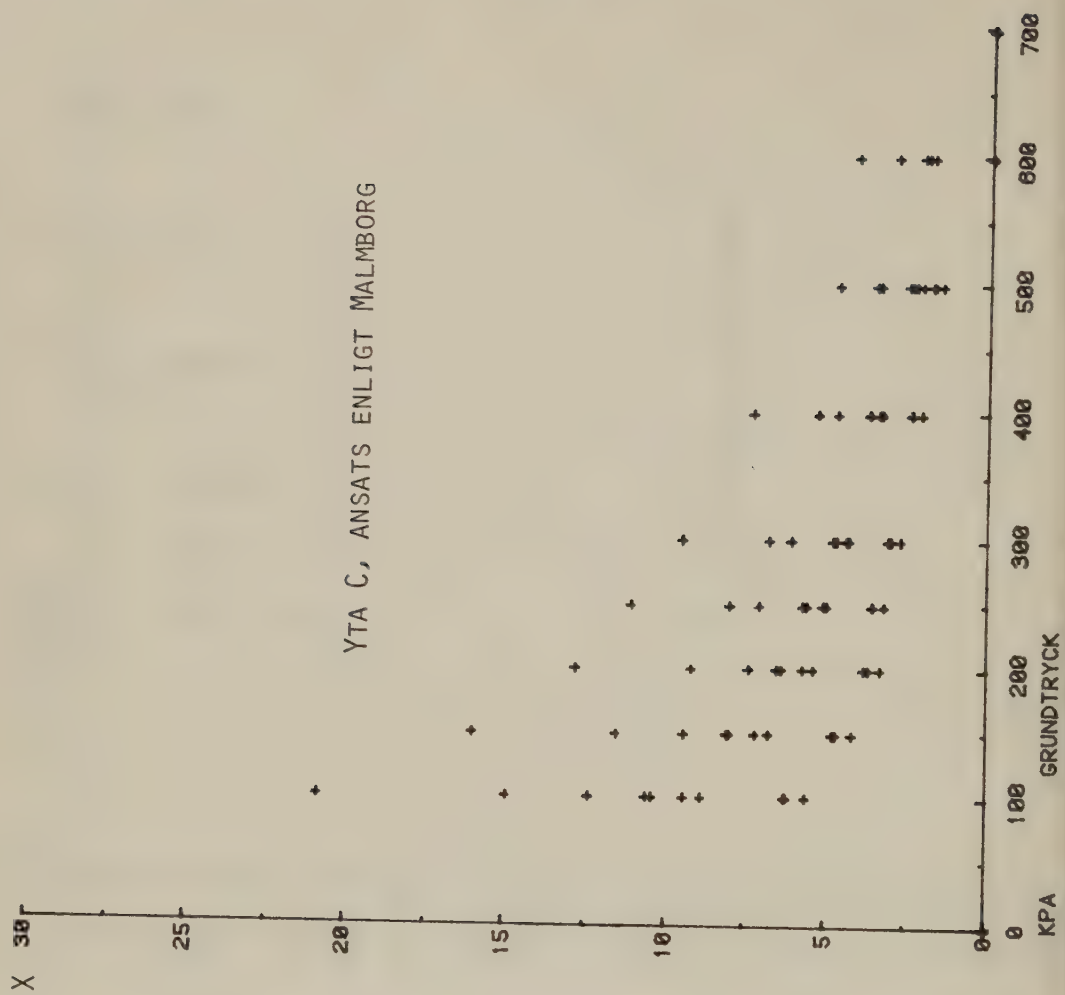
YTA B, ANSATS ENLIGT JAKY



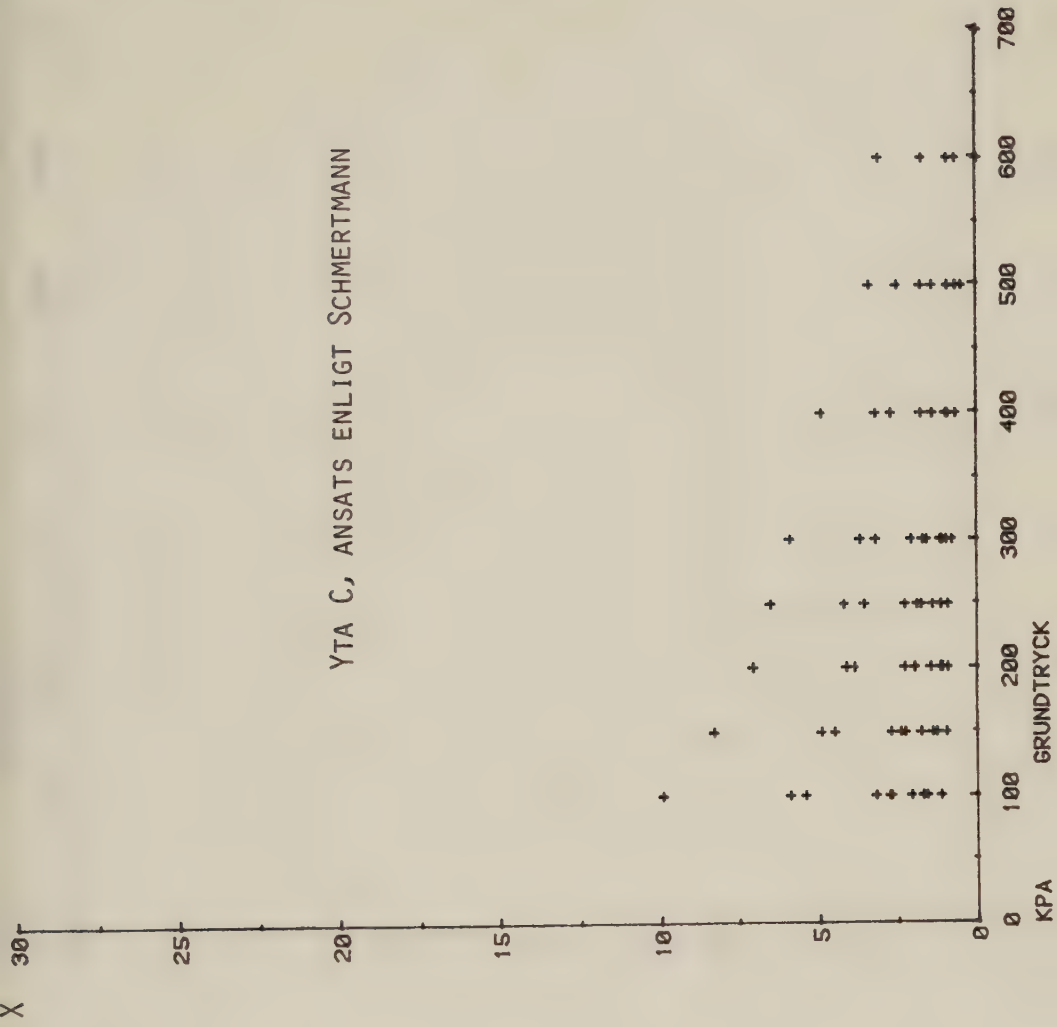


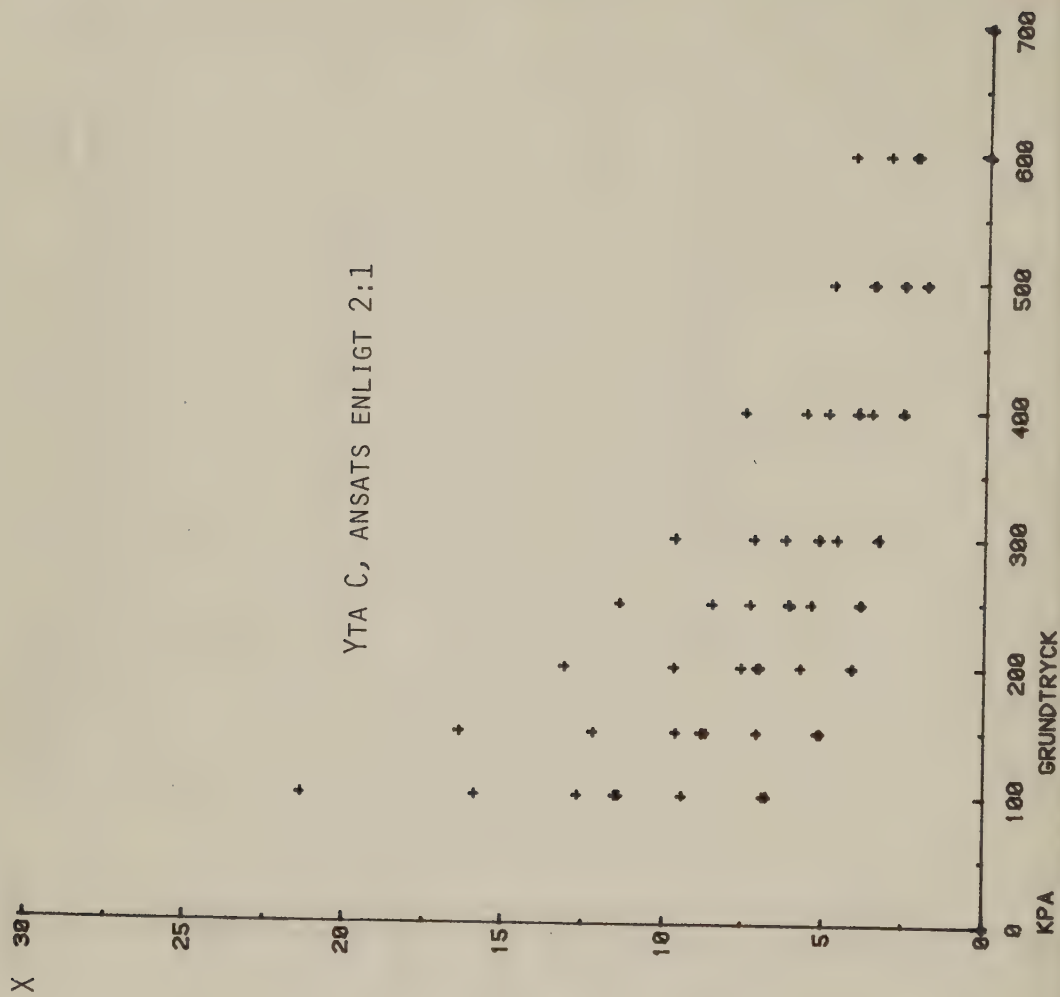




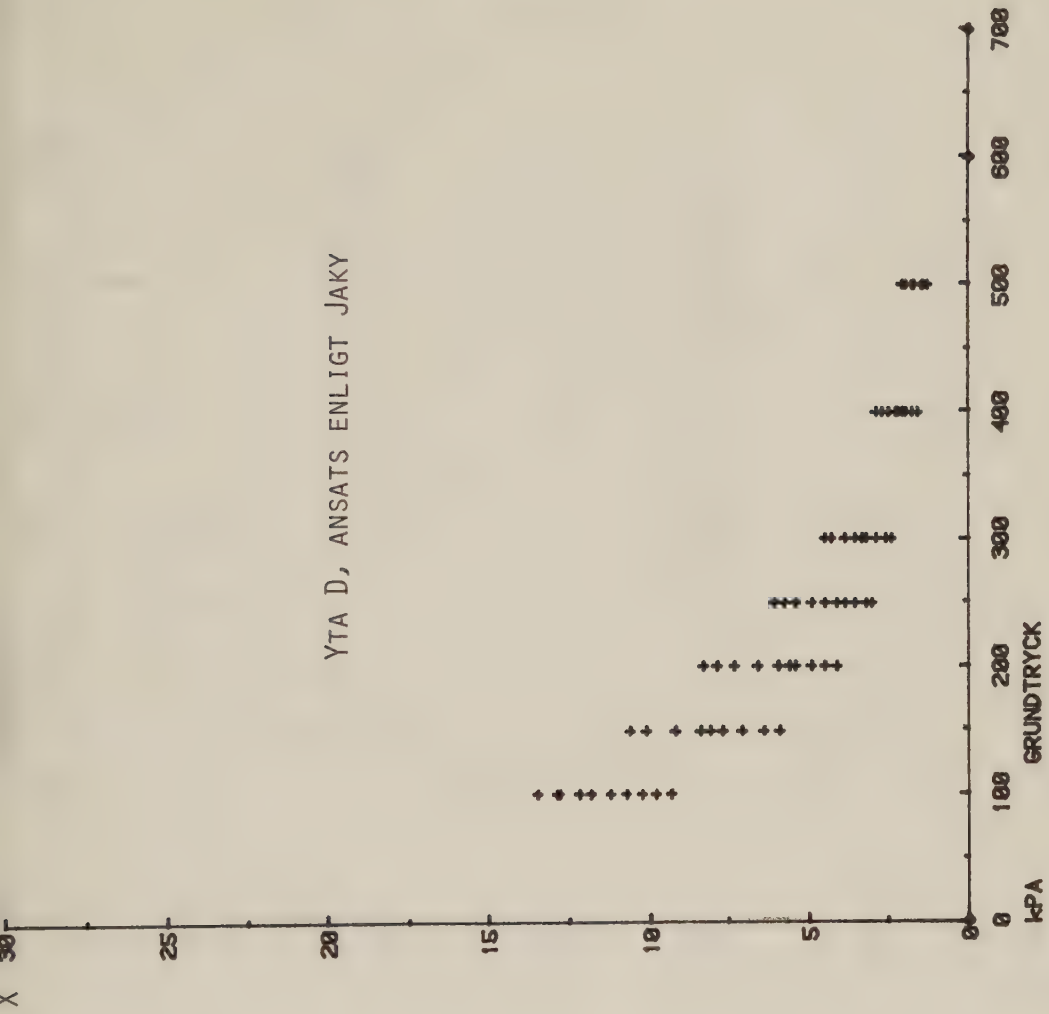


YTA C, ANSATS ENLIGT SCHMERTMANN

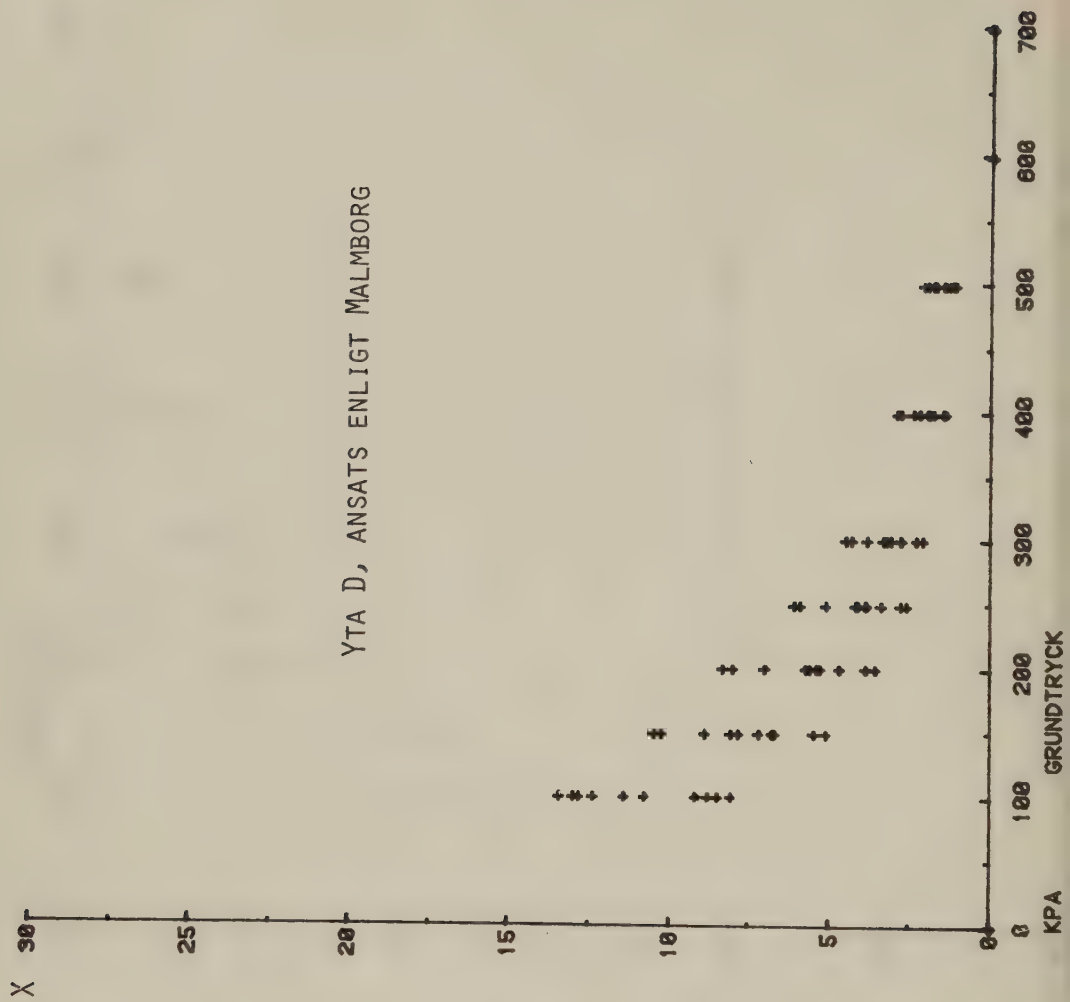




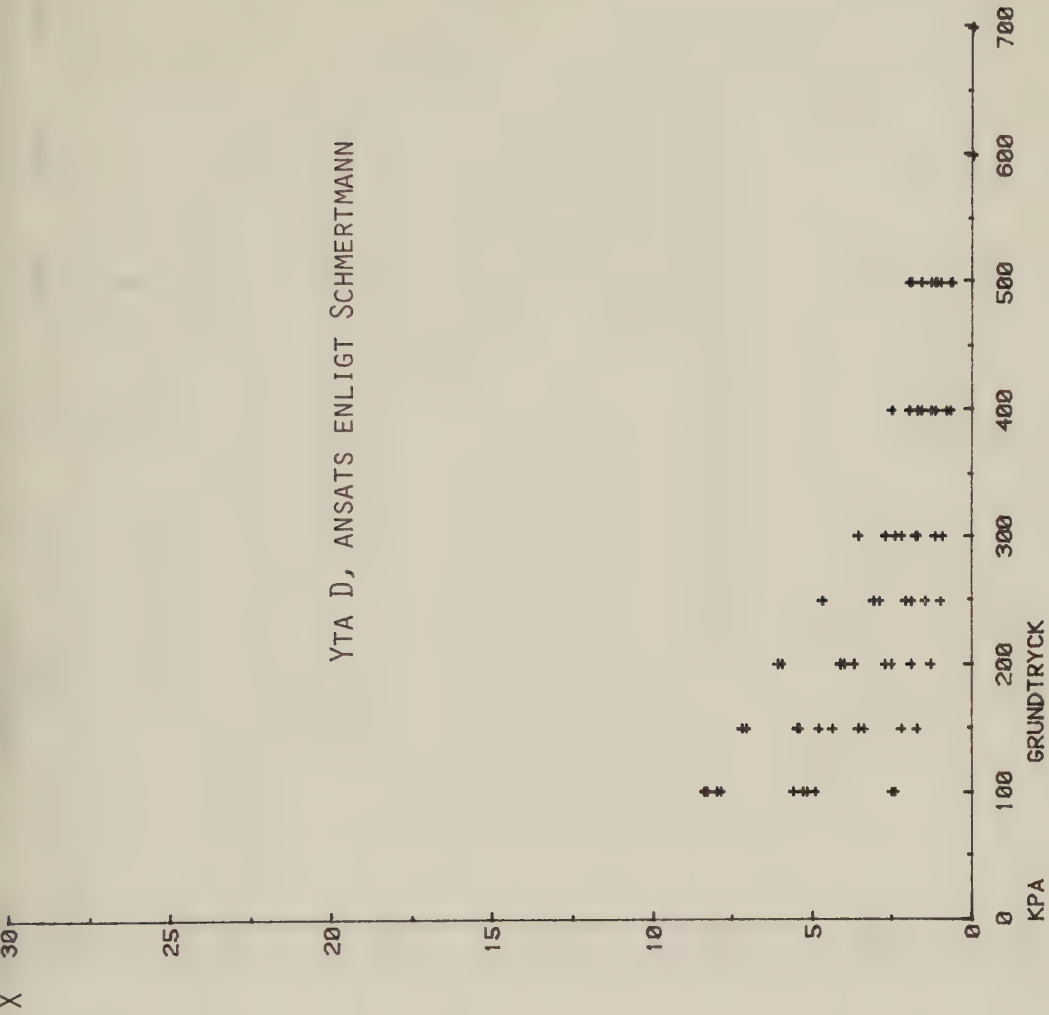
YTA D, ANSATS ENLIGHT JAKY

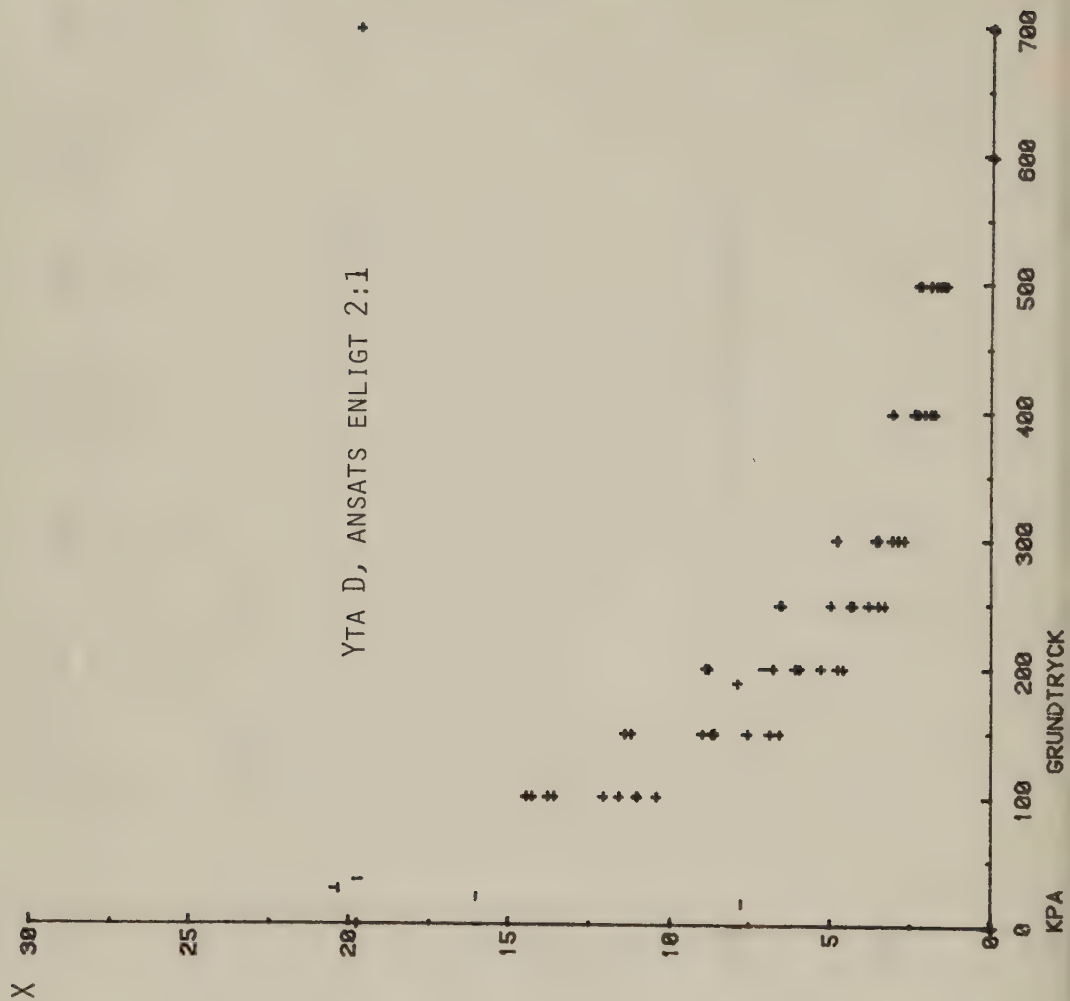


YTA D, ANSATS ENLIGT MALMBORG

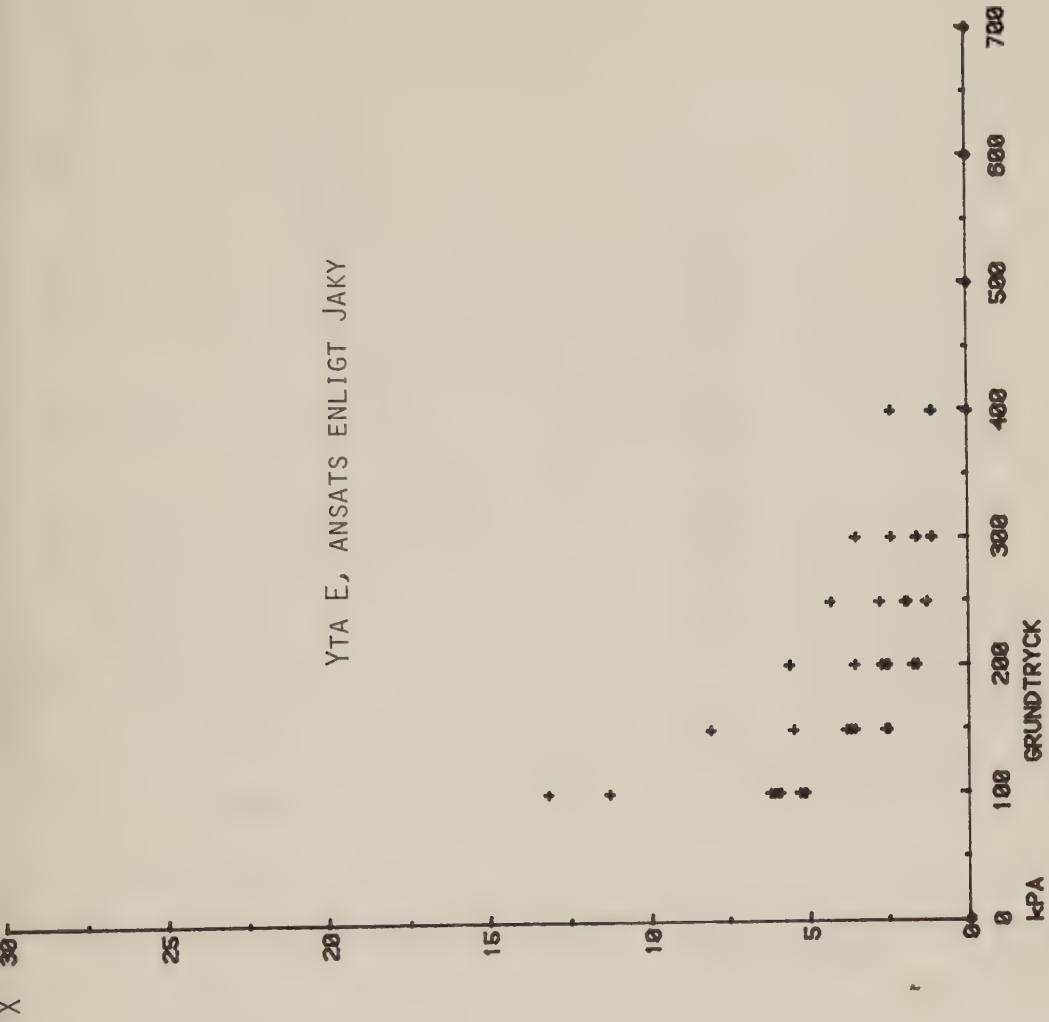


YTA D, ANSATS ENLIGT SCHMERTMANN

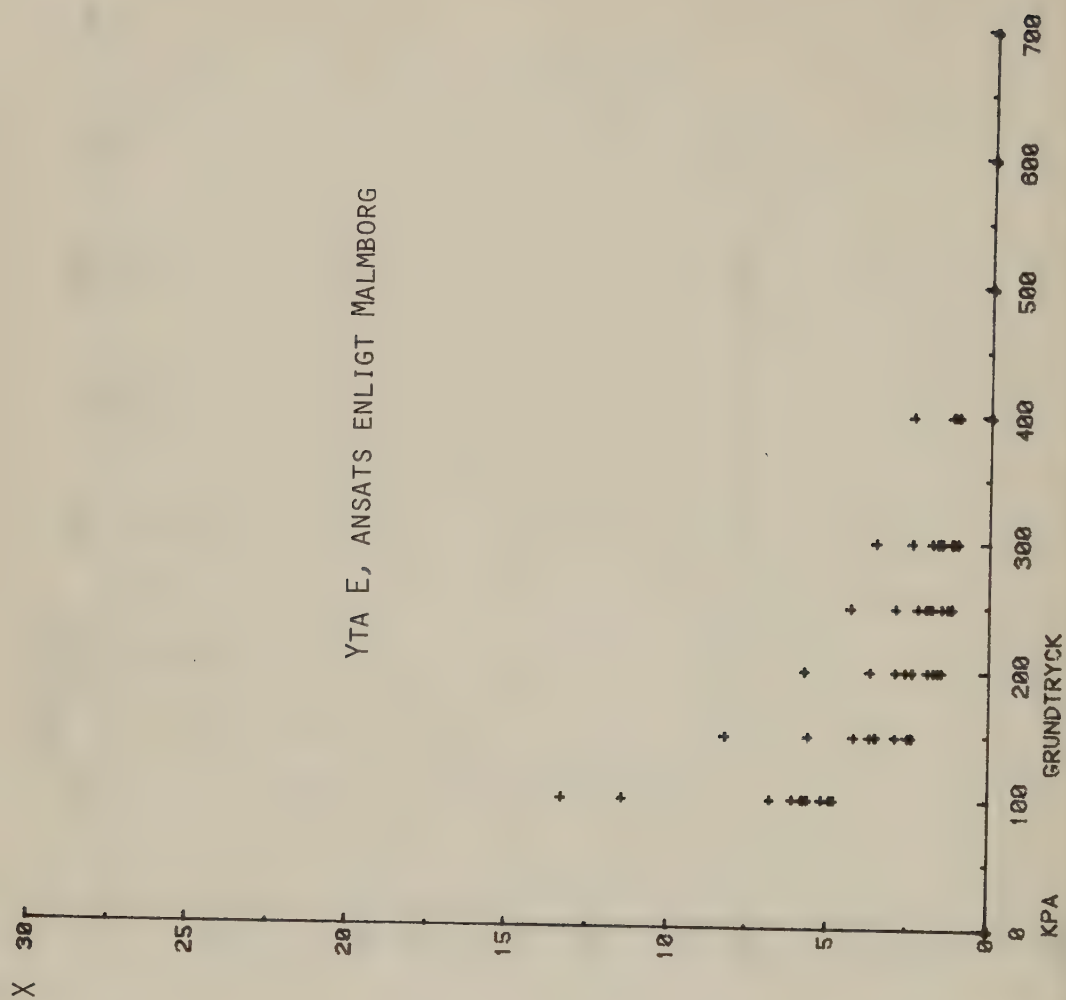




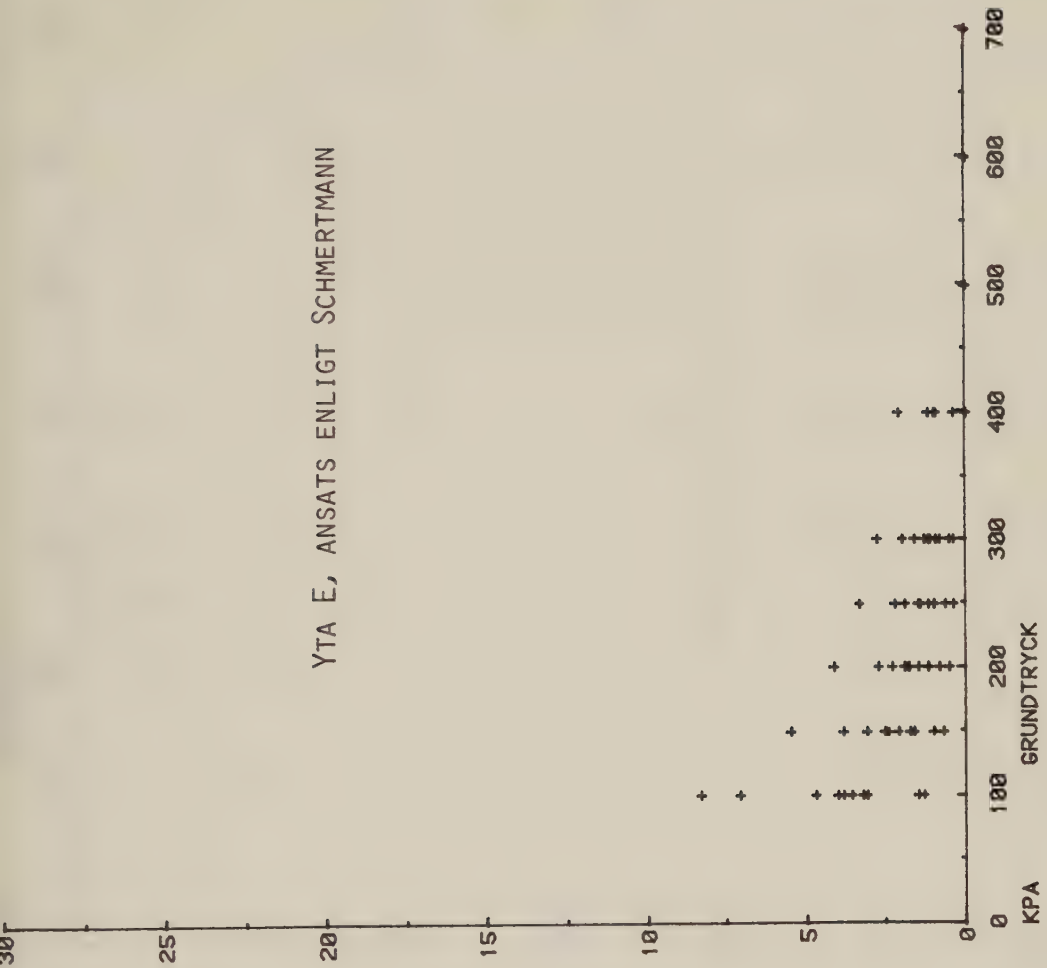
YTA E, ANSATS ENLIGHT JAKY

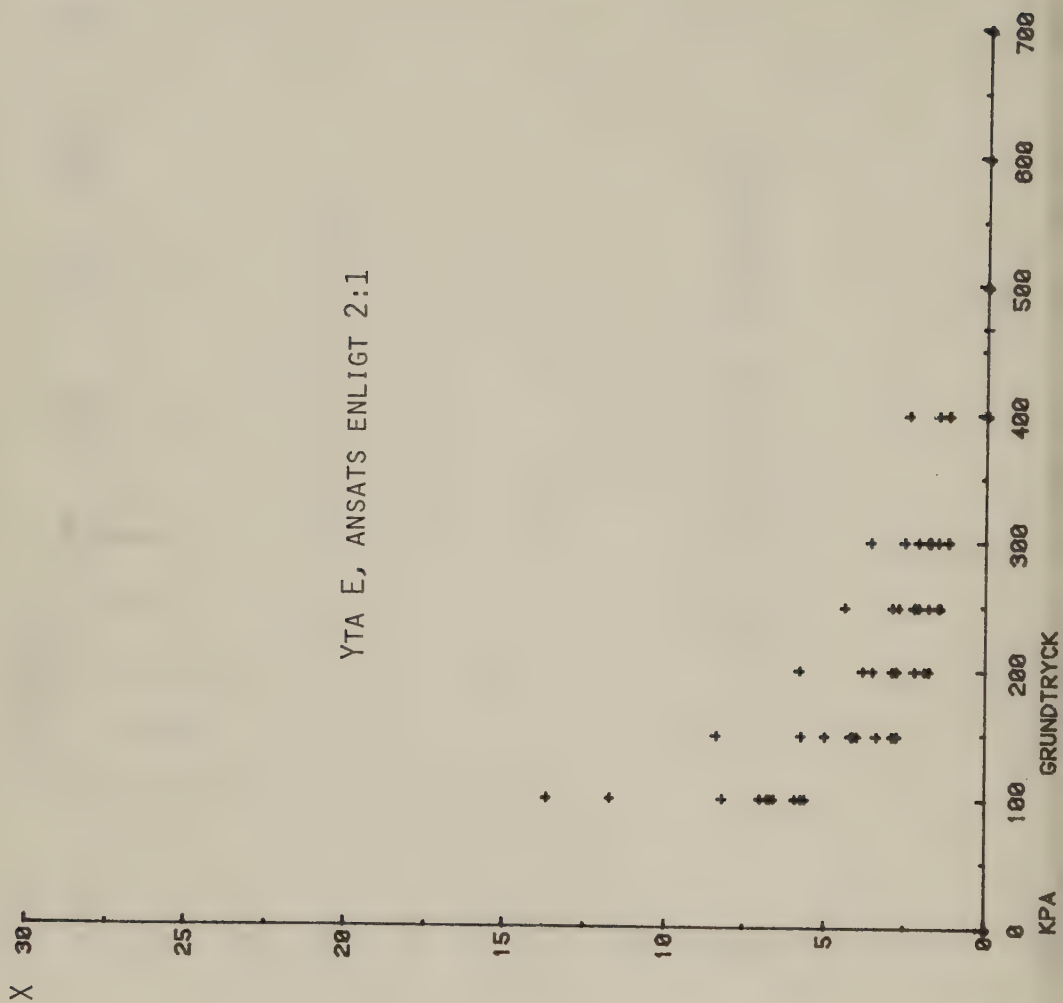


YTA E, ANSATS ENLIGT MALMBORG

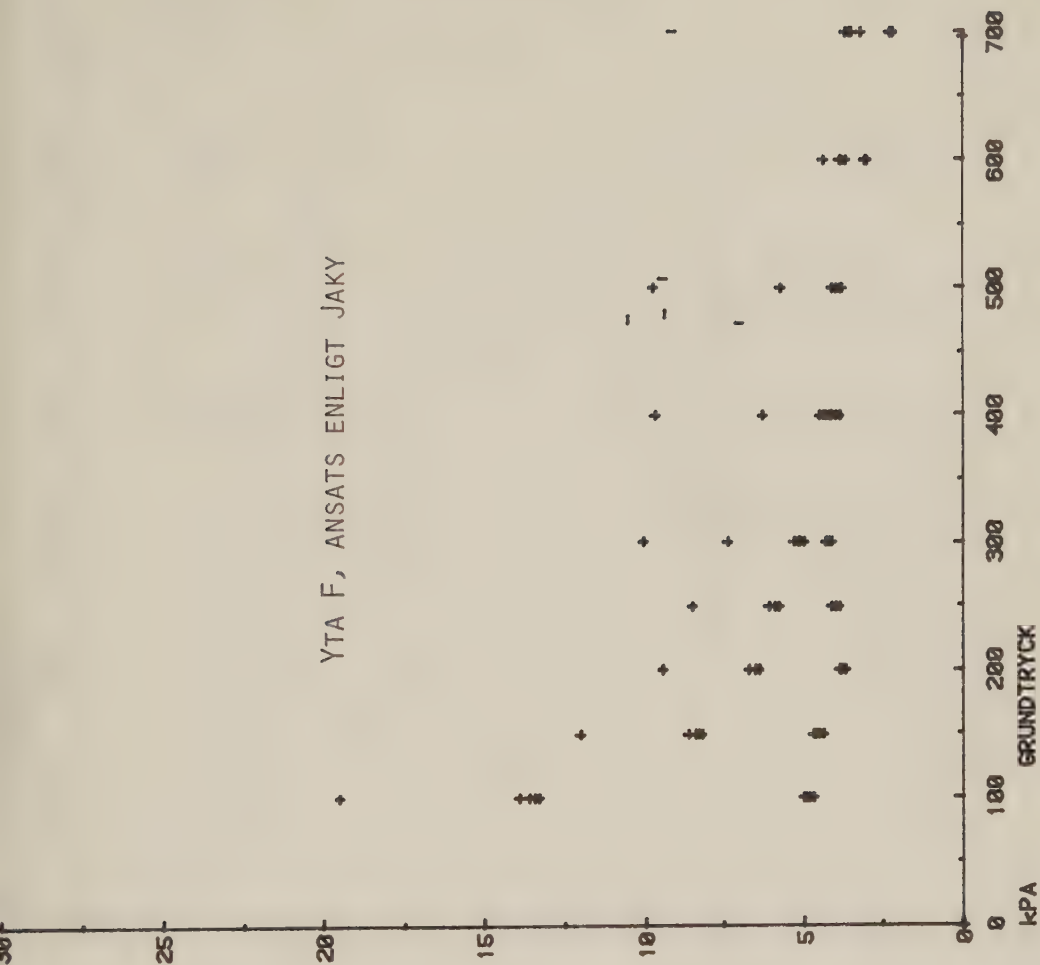


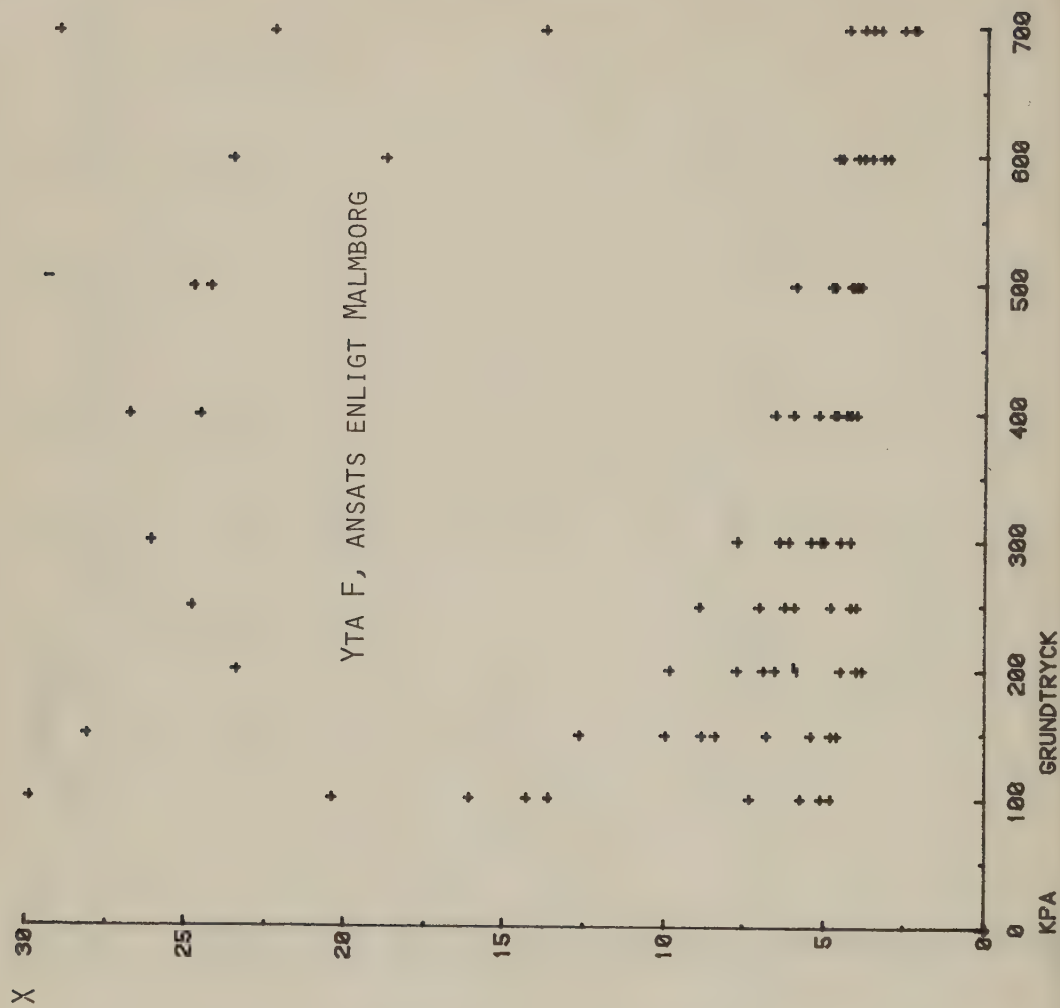
YTA E, ANSATS ENLIGT SCHMERTMANN





YTA F, ANSATS ENLIGT JAKY





YTA F, ANSATZ ENLIGT SCHMERTMANN

